



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

E.N.E.P. ACATLAN

FORMACION DEL LAGO ARTIFICIAL
DR. NABOR CARRILLO FLORES EN
LA ZONA DEL VASO DE TEXCOCO.

M-0028646

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A N:
JUAN ANTONIO GASCA CONEJO
JOSE ELPIDIO RODRIGUEZ AVILA

MEXICO, D.F.

1982



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

E.N.E.P. ACATLAN
COORDINACION DEL PROGRAMA
DE INGENIERIA Y ACTUARIA

CAI-C-0320-79.

SEÑORES:

JUAN ANTONIO GAŞCA CONEJO,
JOSE ELPIDIO RODRIGUEZ AVILA,
Alumnos de la carrera de Ingeniería Civil,
P r e s e n t e s .

De acuerdo a su solicitud presentada con fecha 18 de julio de 1979, me complace notificarles que esta Coordinación tuvo a bien asignarles el siguiente tema de Tesis: "Formación del Lago Artificial Dr. Nabor Carrillo F. en la zona del Vaso de Texcoco", el cual se desarrollará como sigue:

- I.- Introducción
- II.- Características geológicas de la zona del Valle de México.
- III.- Estudios realizados
- IV.- Instrumentación
- V.- Análisis de la información obtenida y su aplicación en el proyecto.
- VI.- Correlación de datos teóricos y reales
- VII.- Conclusiones
- VIII.- Referencias

Asimismo fue designado como Asesor de Tesis el Señor Ing. Rubén Benjamin Reyes Reyes, asesor externo.

Ruego a ustedes tomar nota que en cumplimiento de lo especificado en la Ley de Profesiones, deberán prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito básico para sustentar examen profesional, así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título -- del trabajo realizado. Esta comunicación deberá imprimirse en el interior de la Tesis.



A T E N T A M I E N T E
"POR MI RAZA HABLARÉ EL ESPIRITU"
Acatlán Edo. de México, a 14 de Diciembre de 1979.

ENEP ACATLAN
COORDINACION DE
INGENIERIA Y ACTUARIA
ING. ALEJANDRO RAMIREZ SECENA
Coordinador del Programa
de Ingeniería y Actuaría

Un reconocimiento especial a las personas que en una u otra forma contribuyeron en la realización de este trabajo.

Al Sr. M. en I. Rubén B. Reyes Reyes, por su magnífica dirección y asesoría.

Al Ingeniero: Roberto Camarillo, por la ayuda desinteresada que nos brindó.

Al Honorable jurado. Profesores que contribuyeron a nuestra formación académica y como futuros hombres de sociedad.

A Yolanda Gasca Conejo. Por la difícil labor de haber mecanografiado este trabajo.

Juan - José,

A la memoria de mi padre.
Antonio Gasca Vázquez

A mi madre por su apoyo y comprensión
que me brindó a lo largo de mi carre-
ra.

Ma. Dolores Conejo de Gasca

A mis hermanos.
Rosa, Elia, Edith, Yolanda
Martín y Lupita.

Por su apoyo y comprensión
que en mí tuvieron.

A mi esposa.
Rosalía Cisneros Pedraza

A mi hijo.
Toñito.

Juan Antonio.

Con cariño y respeto
a la memoria de mi padre
Sr. Nicolas Rodríguez T.

A mi madre
Sra. Margarita Avila A. que con
ahínco y ternura me ha motivado
a seguir luchando para formarme
un futuro.

A mis hermanos:

Fernando
Sergio
Samy
Antonia
Angeles y
Lourdes.

Que este trabajo sea una
motivación para que se supe-
ren día con día.

José Elpidio.

INDICE

	Pág.
I.- INTRODUCCION	1
1.2 Antecedentes	5
II.- CARACTERISTICAS GEOLOGICAS DE LA ZONA DEL VALLE DE MEXICO	9
2.1 Fisiografía	9
2.2 Orografía	11
2.3 Geología General	12
2.4 Características Estratigráficas de la zona estudiada	14
III.- ESTUDIOS REALIZADOS	17
3.1 Estudios preliminares en la zona del Lago de Texcoco	17
3.2 Exploración del Subsuelo en la zona del Lago "Dr. Nabor Carrillo Flores"	22
3.3 Características del Subsuelo en la zona del Lago "Dr. Nabor Carrillo Flores"	23
3.4 Estratigrafía de la zona donde se localiza el Lago "Dr. Nabor Carrillo Flores" en base al Sondeo Inalterado SI-1	25
3.5 Sondeos Profundos Complementarios del Lago "Dr. Carrillo Flores"	27
IV.- INSTRUMENTACION	45
4.1 Objetivo de la Instrumentación.	45

M.0028646

4.2 Instrumentación en el Lago "Dr. Nabor Carrillo Flores"	45
4.3 Comportamiento Observado	47
V.- ANALISIS DE LA INFORMACION OBTENIDA - Y SU APLICACION EN EL PROYECTO.....	70
5.1 Métodos Constructivos en la -- Creación de Vasos de almacenamiento	70
5.2 Propiedades Geohidrológicas de los Materiales del Subsuelo del Lago "Dr. Nabor Carrillo Flores"	81
5.3 Predicción de Gastos y Asentamientos en el Lago "Dr. Nabor Carrillo Flores" en base al - modelo matemático	83
5.4 Asentamientos fuera del Campo de Bombeo.	87
VI.- CORRELACION DE DATOS TEORICOS CON-- REALES	113
6.1 Comparación de Gastos Teóricos y Reales	114
6.2 Comparación de Hundimientos - Teóricos y Reales	114
6.3 Comparación de Almacenaje Teórico y Real	116
6.4 Comparación de Costos de Volumen Hundido Teórico y Real ...	116
VII.- CONCLUSIONES	128
VIII.- REFERENCIAS	132

I.- INTRODUCCION

Los objetivos principales hacia los que está orientado el presente trabajo son los de dar a conocer, los estudios e investigaciones realizadas para la formación del lago artificial denominado "Dr. Nabor Carrillo Flores" en la zona del Ex-lago de Texcoco.

El Valle de México abarca una superficie de 9,600 kilómetros cuadrados de los cuales el área urbana ocupa 1,400 Km². En esta zona se presenta una problemática constituida principalmente por inundaciones, tolvaneras y el crecimiento demográfico. Siendo las inundaciones originadas por los escurrimientos superficiales que se presentan en años de intensa precipitación pluvial, las cuales representan un grave peligro, ya que debido al bombeo local de los acuíferos, el hundimiento del área urbana alcanza valores de 9 m en los puntos críticos. El hundimiento significa altas erogaciones de mantenimiento para la ciudad por lo que sus efectos en edificios, redes de agua potable, alcantarillado etc. representan una inversión anual de más de mil millones de pesos.

Tradicionalmente la Ciudad de México padece de tolvaneras que se presentan durante los primeros meses del año como una consecuencia de la erosión de la altiplanicie mexicana donde los vientos del noreste precursores de las lluvias se presentan afectando grandes extensiones del altiplano, contribuyendo de manera muy importante la superficie del antiguo lago de Texcoco.

Los efectos ambientales en la zona urbana de la Ciudad de México causados por las

nubes de polvo, son estimativos, resultando -
muy complejo evaluarlos en términos económicos.

El crecimiento demográfico que padece la Ciudad de México es del 6% anual, por lo que teniendo en cuenta los datos de la Comisión Hidrológica del Valle de México, se estima para 1990 entre 15 y 20 millones de habitantes - y la población correspondiente para el valle de México sería de 21 a 30 millones para esa fecha.

El vaso del antiguo lago de Texcoco, cuyo lecho es más alto que el nivel medio de la ciudad de México, presenta soluciones a los problemas del valle por lo que se ha puesto atención a esta zona, realizando estudios de las aguas superficiales que concurren al lago, así como de las aguas negras disponibles y su tratamiento.

Se llegó a investigar las posibilidades de un uso más completo de las aguas que se generan en la región, lo que resolverá el problema de una posible inundación a la Ciudad de México; habiendo logrado a la fecha reducir el peligro con la construcción del sistema del drenaje profundo, obra de 48 km y con un gasto de 200 m³/seg. No obstante la gran magnitud de ésta obra, se considera que debido a la tendencia del crecimiento demográfico y el consiguiente desarrollo dentro del valle, será necesaria la creación de vasos en la zona del lago, con el fin de regular los escurrimientos superficiales que se generan en esa área, los cuales se caracterizan por ser de corta duración pero de caudales relativamente elevados, sumando a éstas aportaciones las de aguas negras procedentes del río Churubusco, Compañía y Nezahualcóyotl.

Los estudios hidrológicos realiza--

dos por la Comisión Hidrológica de la Cuenca - del Valle de México S.A.R.H, indican que las - aportaciones de los ríos de oriente hacia el - lago de Texcoco ascienden a 39.3 millones de - metros cúbicos anuales ó sea 1.2 m³/seg. donde los escurrimientos en años de precipitación - abundante son de 79 millones de m³. A dichas - aportaciones se suman las aguas negras que -- proceden del sur y oeste, las cuales son alma- - cenadas en el lago, donde parcialmente se eva- - poran y los remanentes son conducidos por el - canal del desague fuera del valle.

De los estudios realizados se des-- prende que las aguas de los escurrimientos su- - perfciales almacenadas podrán ofrecerse a cam- - bio del agua subterránea que se extrae de la - región oriente del lago, mediante el bombeo de - pozos de profundidad que varía entre 30 y 150- - m, con un caudal aproximado de 6.4 m³/seg. don- - de 4.3 m³/ seg. se destinan al riego de unas - 3 000 ha. dedicadas a cultivos diversos y a - dotación de granjas. Así también, el gasto - disponible de las aguas negras tratadas, proce- - dentes de una Planta de Tratamiento ubicada en - la zona del lago, podrían llevarse a cambio - del agua subterránea del oriente y a la vez - encontrar mercado dentro de la Ciudad de Méxi- - co.

En base a las investigaciones rea-- lizadas en la zona del lago de Texcoco se optó - por la construcción del lago "Dr. Nabor Carril- - lo Flores" teniendo como antecedentes, los - estudios realizados en la zona, por el Dr. Na- - bor Carrillo Flores, preponderantemente en lo - relativo al agua subterránea y a las caracte- - rísticas del subsuelo; la formación del lago - será producto de la consolidación de las arcil- - las mediante la extracción de agua de las ca- - pas arcillosas por medio de pozos someros.

La creación de este vaso servirá para regular y almacenar las corrientes de los ríos: Teotihuacán, Papalotla, Xalapango, Coxcacoaco, Texcoco, Chapingo, San Bernardino, Sta. Mónica y Coatepec, así como las aguas negras tratadas.

Además la conveniencia de crear un pequeño vaso de regulación, para las aguas negras que alimentaría a régimen constante a la planta de tratamiento.

La creación de éstos lagos será con el fin de resolver el peligro de inundación a la Ciudad de México, así como reestructurar la zona degradada para lograr el saneamiento y restablecer su ecología perdida, teniendo como metas el formar una Infraestructura, Hidráulica, Hidrológica, Forestal, Agrícola, de Comunicación, Urbana, Ornamental y Turística de la zona.

I.2 ANTECEDENTES.

La cuenca del Valle de México.

De acuerdo a investigaciones realizadas en Tlapacoya, Estado de México, se cree que la cuenca del Valle se comenzó a poblar - hará 22 mil años. Se trataba de recolectores, pescadores y cazadores agrupados en comunidades - de 100 a 200 individuos. Con la aparición - de la agricultura, hace 3000 años A.C. se inició su vida sedentaria y no fué sino hasta el año 1100 antes de la era cristiana, cuando se formaron las primeras aldeas, cuya población - no era mayor de 1000 moradores, como ejemplo - de ello, tenemos los poblados de Tlatilco, Zacatenco y el Arbolillo.

Al inicio de la era cristiana, la - población de la cuenca se fué incrementando - paulatinamente, a tal grado, que en el año -- 650, ésta sería de 85 000 habitantes. Con la consolidación de los pueblos de Anáhuac; cuando Tenochtitlán se encontraba en su esplendor, la población debió ser aproximadamente de 2 a 3 millones de pobladores.

Es importante hacer notar que a excepción de los Tenochcas, todos los pueblos se establecieron en las márgenes del lago de la - Cuenca de México.

El área lacustre original se estimó en 1575 km², y estaba alimentada por los escurrimientos de los ríos, el deshielo de los volcanes y el flujo de manantiales; este gran -- lago tenía una profundidad promedio de 10 m y de él se separaban otros menores que se denominaban: Zumpango, Xaltocan, San Cristobal, - Chalco y Xochimilco. Con todo ello, la socie-

dad mesoamericana anterior a la conquista, estuvo fundada en una tecnología hidráulica, (diques, canales) mediante la cual se podía tener excedentes agrícolas.

En base en esta tecnología y procurando un estilo de vida vinculado estrechamente con la naturaleza, los Tenochcas utilizaron las chinampas para aumentar el suelo disponible para cultivo, utilizando los diques, como vía de comunicación y además se canalizaba el agua dulce, para el consumo doméstico y para el lavado de tierras salitrosas.

1 Además del uso anterior, los diques servían para moderar el flujo de los ríos y lagos, con lo cual éstos mantenían su nivel e impedían la invasión de aguas salobres.

Como el valle se encontraba en una zona de constante precipitación pluvial, en muchas ocasiones las lluvias provocaban inundaciones, teniéndose noticias que la registrada en el año de 1447, tuvo consecuencias desastrosas.

Para evitar inundaciones, Nezahualcoyotl diseñó y construyó un dique que iba del cerro de la Estrella en Ixtapalapa al pueblo de Atzacolco, cerca de Tepeyacatl, con una longitud de 16 km mediante el cual dividió el lago en dos partes: una al oriente, de mayor extensión llamada lago de Texcoco, y otra menor denominada lago de México.

Con la llegada de los españoles a Tenochtitlán, la armonía que prevalecía en la Cuenca del Valle se ve afectada; de tal manera que con la llamada conquista, la población disminuyó en forma notable y juntamente los

modelos de producción y la tecnología que era característica de los antiguos mexicanos, se vio dañada.

Con el fin de reestructurar las vías de comunicación que prevelecián en aquella época, los españoles se dedicaron a convertir las veredas indígenas en caminos de herradura, y a modificar los sistemas hidráulicos que por mucho tiempo habían elaborado los mexicas, al grado de romper el albarrado de Nezahualcóyotl, para usar las piedras en la construcción de la Nueva Ciudad, pero más tarde tuvieron que repararlo y construir otros, debido a las constantes inundaciones. Entre las más importantes por su magnitud, se mencionan las registradas en 1533, 1580, 1604 y 1607.

En el año de 1604 se decidieron por sugerencia del cosmógrafo Enrico Martínez, expulsar las aguas del lago fuera de la cuenca, por medio del túnel de Nochistongo, el cual años más tarde se convirtió en el tajo del mismo nombre. Esto produjo superficies lacustres libres, donde los vientos levantaban nubes de polvo que afectaban a la ciudad. Fué quizás el principal error que cometieron ya que a partir de entonces, se inició el desequilibrio ecológico en la zona.

Con esta y otras acciones más, la superficie lacustre decreció rápidamente, ya que para 1861 sólo quedaba un 15% (230 km²), y en 1891 era del 6% con (91 Km²).

La población en el valle se fué incrementando poco a poco durante la época de la colonia, siendo este incremento más intenso en los últimos años. En 1790 los habitantes que había en la Ciudad de México eran 112 926 y

100 000 más en el resto del valle, para 1950 - la población era de 3'043 372 de ese año a 1980 - se incrementó a 15'000 000 de moradores. Lo que hizo necesario abastecer una mayor cantidad de agua potable, ocasionando con esto hundimientos en la Ciudad de México, mientras el fondo del lago quedaba en un nivel superior al de la ciudad. Fué entonces necesario desalojar un mayor volumen de agua, entrando en operación hace cuatro décadas el segundo túnel de Tequisquiác alimentado por el gran canal del desague.

Actualmente se tiene el túnel del drenaje profundo, obra de 48 km de longitud y 200 m³ de capacidad que conduce por gravedad las aguas negras y pluviales fuera del valle ayudando a evitar la amenaza de inundación a la Ciudad de México.

Al secarse el lago de Texcoco después de la apertura de las obras de desague, se ha recrudecido el problema de tolvaneras. Estudios demográficos indican que la Ciudad de México junto con otros Centros Urbanos e Industriales, instalados en el Valle, sufrirán un crecimiento acelerado, estimándose que la población del conjunto ascenderá a 40'000 000 de habitantes para el año 2000, será entonces inevitable la ocupación de la superficie del lago, hecho que ya ha ocurrido al sur del Bordo Xochiaca anexo a Ciudad Nezahualcóyotl.

CAPITULO II

CARACTERISTICAS GEOLOGICAS DE LA ZONA
DEL VALLE DE MEXICO.

2.1.- Fisiografía.

La cuenca de México está situada en el borde sur de la mesa central entre los meridianos $98^{\circ}15'$ y $99^{\circ}30'$ y los paralelos $19^{\circ}00'$ y $20^{\circ}15'$ quedando comprendida en el centro de la zona volcánica que atraviesa a la República Mexicana de Oeste a Este y ocupa un espacio en donde la corteza terrestre ha sufrido grandes esfuerzos tectónicos desde los principios del Terciario, ya que en este período empezaron a aparecer sedimentos de origen volcánico cuyas erupciones ocurridas en distintas fases, han formado acumulaciones extraordinarias de lavas, tobas y brechas. Pocas regiones en el mundo exhiben una variedad tan prodigiosa de formas volcánicas como la cuenca de México, que presenta un contorno irregular, alargada de Norte a Sur con una extensión amplia hacia el Nor-este, fig. 1 con una altitud que oscila entre 2,240 m. al Sur y 2,390 m. al Norte, esta cuenca cerrada contiene varios lagos someros, siendo el de Texcoco el mayor y el que ocupa el nivel más bajo. Le sigue en importancia la laguna de Zumpango en el Noroeste mientras que el lago de Chalco, hasta hace poco el tercero en importancia, dejó de existir a principios de este siglo.

Estos lagos son los últimos vestigios de numerosos lagos mucho mayores, que al final de la época glaciaria probablemente formaban un solo y gran cuerpo de agua poco profundo, actualmente hacia el Noreste de la cuenca, existen, varias depresiones ocupadas por lagunas someras como las de Apan, Tochac y Tecoco-

mulco que en época de estiaje desaparecen.

Es posible dividir la cuenca desde el punto de vista fisiográfico, en tres zonas:

- a) la zona meridional
- b) la zona septentrional
- c) la zona nororiental

a) La zona meridional, está limitada al Este por las Sierras Nevada y del Río Frío, al Oeste por la Sierra de las Cruces, al Sur por la Sierra de Chichinahutzin, y al Norte por: la Sierra de Guadalupe, el Cerro de Chiconautla y la Sierra Patlachique, esta zona cuenta con las mayores y menores elevaciones y con una abundante precipitación pluvial en comparación a las otras zonas, por lo tanto presenta una vegetación más desarrollada y su monotonía está interrumpida por varias elevaciones aisladas, así como por una cadena de volcanes muy recientes como los de la Sierra de Santa Catarina.

b) La zona septentrional de la cuenca está ligada a la Meridional por el estrecho de San Cristóbal, localizado entre el Cerro de Chiconautla y la Sierra de Guadalupe.

Esta región representa la continuación de la planicie Meridional, y se extiende hacia el Norte hasta la Sierra de Pachuca al Oeste y Noroeste se localizan las sierras de Monte Alto y Tepotzotlán formando un parteaguas y localizándose múltiples cerros aislados.

Dicha zona se distingue por lluvias escasas y una vegetación precaria, drenando en forma natural hacia el Sur por el Río de las Avenidas al área baja de la laguna de Zumpango que tiene casi la misma elevación que la planicie central de la zona Meridional.

c) La zona Nororiental de esta cuenca ocupa una superficie menor que las anteriores, dominando su paisaje una multitud de elevaciones volcánicas menores y sin orden. Se extiende esta zona en una franja ancha hacia el Este, ocupando un espacio llano y extenso entre las cumbres de las Sierras de Pachuca y de la Sierra de Río Frío. Carente de un drenaje bien definido los arroyos se pierden en pequeñas cuencas cerradas, dotadas de un clima casi desértico, la zona Noreste presenta una multitud de conos volcánicos con diferentes grados de erosión, ofreciendo en época de secas un aspecto desolado.

2.2.- Orografía.

La cuenca presenta una cadena de altas montañas que constituyen el muro que la rodea, al Sureste se encuentra la Sierra Nevada enmarcada por los perfiles del Popocatepetl de 5,438 m. de altura sobre el nivel del mar y el Iztaccihuatl de 5,286 m., la Sierra Nevada se une en el Sur con la del Chichinahutzin y la del Ajusco. Este cordón montañoso se proyecta al Suroeste con las Sierras de las Cruces, Monte Alto, Monte Bajo, continúa al Noroeste la Sierra de Tepotzotlán para cerrar al Norte con las Sierras de Tezontlalpan y Tolcayuca, así como por las eminencias geográficas de la Sierra de Pachuca.

En la planicie al Este, y con direc

ción Norte a Sur se proyecta una pequeña Sierra que de hecho separa una porción del Valle de México, formando la cuenca de Apan, en la que se localiza la laguna del mismo nombre.

En la cuenca se encuentran formaciones como la Sierra de Guadalupe, al Norte de la Ciudad de México; cuya altura mayor es la del Cerro del Sombrero de 3,000 m., y marca el extremo Norte del Distrito Federal.

Al Este de la cuenca se encuentra la Sierra de Santa Catarina en el área de Chalco, finalmente hay que mencionar algunas de las eminencias aisladas como el Peñón de los Baños y el del Marquez dentro del perímetro urbano de la Ciudad de México, así como el Cerro de Chapultepec.

2.3.- Geología General.

La geología de la cuenca de México y de sus zonas colindantes comprende formaciones marinas plegadas del Mesozoico y depósitos volcánicos continentales del Cenozoico dislocadas y fracturadas en su mayor parte, cuyas manifestaciones geológicas fueron creadas en los últimos cien millones de años.

La cuenca de México contiene formaciones volcánicas aluviales y lacustres, pertenecientes al Terciario Medio, al Terciario Superior y al Cuaternario.

La formación del Terciario Medio es la más antigua y potente que aflora en la cuenca; representa una formación acumulativa poderosa que comprende todos los productos volcánicos emitidos entre el Oligoceno Superior y el Mioceno, con una duración de 22 millones de

años, abarca el grupo volcánico más antiguo que aflora en la cuenca del Río Amacuzac, en forma discordante sobre el grupo clástico Balsas la serie volcánica Xochitepec se compone totalmente de depósitos típicos del Terciario Medio, así como las Sierras de Guadalupe, de Tepotzotlán y los yacimientos metálicos de Pachuca.

Los depósitos del Terciario Superior o Plioceno, están representados por distintas formaciones, unas volcánicas y otras aluviales, tuvieron un lapso de duración de 9 millones de años y parece iniciarse después de los períodos de inactividad volcánica, de erosión y de peneplanización.

Al Plioceno pertenecen los complejos elevados de las Sierras de Guadalupe, de Tepotzotlán, las de la Sierra del Tigre por Atizapán de Zaragoza, las de la Sierra Tlaixpan en la región de Texcoco, así como las prominencias del Peñón de los Baños, el Cerro del Ajusco, los conos antiguos del Iztaccihuatl, del Popocatepetl y los cerros del Tepozteco.

También dentro de esta formación se encuentra la Sierra andesítica Santa Isabel-Peñón, Sierra de Tepotzotlán, la Sierra de las Pitallas, el Cerro del Sincoque y elevaciones extensas al norte de Zumpango y Tizayuca, además que la toba de los Remedios superpuesta y a menudo separada por varios horizontes de pomez, constituyen la mayor parte de la formación Tarrango Inferior a fines del Terciario y el comienzo del Cuaternario, los depósitos se caracterizan por un cambio de clima de seco a húmedo y por nuevos impulsos tectónicos que principiaron en el Plioceno Superior y que alcanzaron su máximo desarrollo en el Pleistoceno desde hace aproximadamente unos 600 000 años hasta nuestros días, iniciando así el último ciclo de vulcanismo dándole un marcado sello en los últimos acontecimientos que moldearon la cuenca de México.

En esta época las lluvias formaron grandes arroyos y tormentas que al aplicar su acción en los depósitos pocos resistentes de la Formación Tarango Inferior formaron dos sistemas fluviales, cavando profundos cañones en el interior de la Sierra de las Cruces, la Sierra Nevada y formando el cañón Contreras y el de San Rafael. Contemporáneas al desarrollo de estas redes fluviales, ocurrieron erupciones al norte de la Cuenca, formando volcanes basálticos como el Cerro Gordo, los Cerros de Chimalhuacán, los Cerros de Chiconautla y de Tultepec, además surgió la mayor parte de lo que es hoy el Iztaccihuatl y se formó la serie volcánica del Chichinautzin.

En el sur de la cuenca también aparecen erupciones, formando una pequeña zona basáltica en el Sur de la Sierra Nevada que llega a formar el pecho del Iztaccihuatl después hacia el Norte surgen las lavas del Teoyotl, al Sur del Río Frío se forma el cono volcánico del Papayo, nacen los conos volcánicos de la Sierra de Santa Catarina, siendo el Xitle el último volcán en aparecer y las lavas formaron el Pedregal de San Angel, la erupción del Popocatepetl en 1920 y las fumarolas que ha emitido el volcán comprueban que continúan hasta la fecha las fuerzas internas que crearon la Cuenca de México.

2.4.- Características Estratigráficas de la Zona Estudiada.

El área en estudio está localizada en una planicie que originalmente formaba parte del fondo del lago de Texcoco, cuyo subsuelo está constituido por la acumulación de sedi

mentos lacustres recientes de más de 50 m. de espesor. Estos sedimentos son producto de la erosión de las rocas que forman las Sierras - que rodean al lago y de las grandes cantidades de cenizas arrojadas por los volcanes recientes, los sedimentos se clasifican en dos grupos:

Sedimentos Clásticos, que son partículas finas y gruesas formadas por el intemperismo físico y químico de las rocas circundantes las cuales fueron transportadas por las corrientes pluviales y paulatinamente depositadas en el fondo del lago, los tipos de sedimentos en esta zona son: gravas, arenas, limos y arcillas.

Sedimentos Piroclásticos, se les ha llamado a las grandes cantidades de cenizas arrojadas por los volcanes recientes sobre lo que fué el fondo del lago de Texcoco, y que posteriormente quedaron sepultados por otro tipo de sedimentos. Las cenizas se presentan como pequeños horizontes arenosos interestratificados con las arcillas y cubren uniformemente áreas extensas.

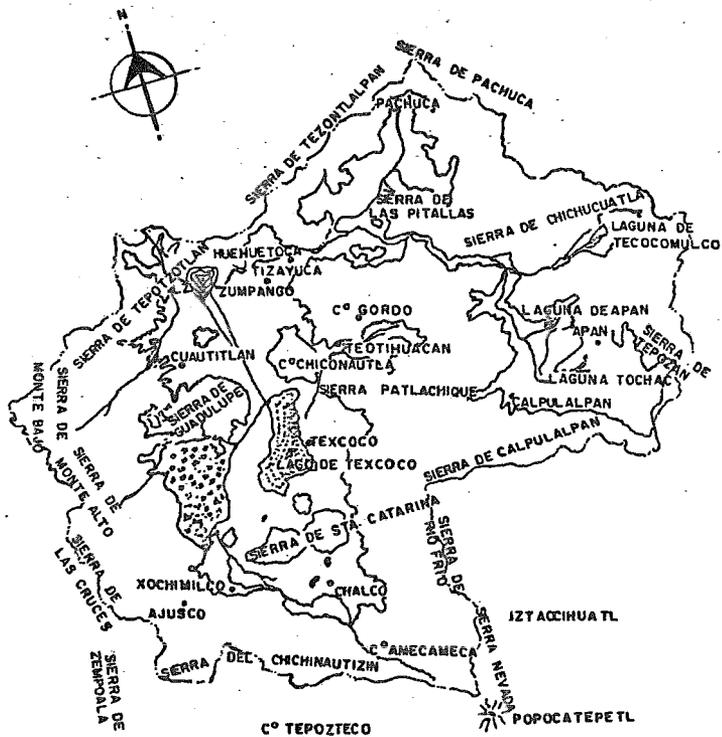


FIGURA I LAS SIERRAS Y LOS LAGOS DE LA CUENCA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

CAPITULO III

ESTUDIOS REALIZADOS

3.1.- Estudios Preliminares en la Zona del Lago de Texcoco.

Los estudios de exploración mediante métodos Geofísicos y de perforación que se realizaron anteriormente a la formación del lago "Dr. Nabor Carrillo Flores", permitieron ampliar los conocimientos Geológicos del Valle, así como la Hidrología subterránea y determinar las propiedades de los materiales del subsuelo.

Para los estudios Geofísicos se aplicaron los métodos: Sísmico, Gravimétrico y Magnetométrico.

En los años 1952 -53 se realizó un levantamiento Gravimétrico en la parte plana del valle localizando cuatro subcuencas subterráneas: Teotihuacán, Texcoco, Ciudad de México y Chalco. En la subcuenca de Texcoco y cerca del cerro de Chimalhuacán se localizó un bajo Gravimétrico el que quizás podría presentar una estratigrafía más compleja. Tomando como referencia al anterior estudio se realizó un levantamiento sísmico de Chimalhuacán a Cerro Gordo llamándose línea base que cruzó el bajo Gravimétrico, de la misma manera se realizó la segunda línea del Cerro del Peñón de los Baños a Chapingo fig. 2. En la intersección de estas dos líneas se perforó el pozo profundo PP-1 con el propósito de determinar la estratigrafía en ese punto y comprobar la interpretación sismológica de la zona.

En línea base se realizaron dos de los métodos de exploración sísmica: el de reflexión y el de refracción en línea, el último proporcionó mejor información y fué el que se utilizó en los trabajos subsecuentes.

Para determinar los perfiles estratigráficos se detectaron dos refractores "A" y "B" en las dos líneas sísmicas, observándose que los refractores en la línea base presentan una fuerte pendiente hacia el cerro de Chimalhuacán, mientras al noroeste del PP-1 y a una distancia de 3 km el refractor "A" llegó a una profundidad de 770 m. y el "B" a 1,850 m. lo que aparentemente indica que en la zona del refractor "A" se depositaron los derrames del volcán de Chimalhuacán fig. 3. Los refractores en la línea 2 muestran su mayor profundidad en las cercanías del PP-1, siendo el manto arriba del refractor "A" menos compacto en la dirección del Peñón de los Baños que hacia Chapingo.

La información se complementó con una tercera línea para determinar el perfil sobre el PP-1 y los cerros de Huatepec y Tepetzingo; perpendicular a esta se levantó la línea sísmica 4 localizada entre los dos cerros que mostró la presencia de roca ígnea a una profundidad de 50 m. Posteriormente se realizó un levantamiento gravimétrico y magnetométrico simultáneos determinándose la presencia de un volcán en las cercanías de los cerros de Huatepec y Tepetzingo.

De los resultados obtenidos en las cuatro líneas sísmicas de refracción se hizo la configuración de los refractores "A" y "B" que permite concluir que los derrames de roca ígnea y material piroclástico en el subsuelo -

de Texcoco, provinieron principalmente de tres procesos volcánicos: el primero formado por el volcán de Huatepec llegando sus emisiones más profundas hasta el cerro de Chimalhuacán, y las más recientes sólo alcanzaron hasta el punto medio de la tercera línea sísmica; el segundo está constituido por los cerros Gordo y Peñón de los Baños y el tercero por el cerro de Chimalhuacán cuyas emisiones yacen sobre los derrames profundos del volcán de Huatepec.

3.1.1.)- Perforaciones Profundas.

Para conocer la estratigrafía del subsuelo del lago se planeó la perforación de tres pozos:

a).- El pozo No. 1 (PP-1) que se localiza en la intersección de las líneas sísmicas base y 2 con una profundidad de 2,065 m. La litología que mostró fué la siguiente: de 0 a 180 m. capas de arcillas, limos y arenas, de 180 a 505 m. arcillas, lutitas, arcillas arenosas, arenas, areniscas y calizas lacustres probablemente de origen termal, de 505 a 1437 m. tobas, rocas ígneas, brechas y conglomerados, de 1437 a 1980 m. tobas líticas, rocas ígneas y arenas, de 1980 a 2045 m. anhidritas arcillosas y margas, de 2045 a 2065 m. arcillas, margas y conglomerados calcáreos.

b).- El pozo No. 2 (PP-2) se proyectó localizarlo a 2500 m. al noroeste del PP-1 sobre la línea sísmica base, su construcción no se realizó debido a que se decidió prolongar la perforación del PP-1 de 1500 a 2065 m.

c).- El pozo No. 3 (PP-3) se localiza a un lado del camino Peñón Texcoco y a 2580 m. al noroeste del PP-1 su profundidad llegó hasta 589 m., la litología que presenta-

es muy similar a la del PP-1.

Para complementar la información de la estratigrafía del subsuelo se realizaron tres perforaciones de pozos de agua a una profundidad máxima de 300 m. en la parte nororiental del Lago de Texcoco. Además para conocer las características de las rocas que forman a los cerros de Huatepec y Tepetzingo se realizó un sondeo en cada eminencia denominados H-1 y H-2. El primero se localizó en el cerro de Tepetzingo a una profundidad de 12 m, donde su análisis petrográfico determinó que las rocas corresponden a una andesita de hipersteno. El segundo localizado en Huatepec llegó a una profundidad de 10 m y se determinó que la roca corresponde a una andesita de Augita.

3.1.2.) - Sondeos Profundos BNP-1, BNP-2 y BNP-3.

La realización de estos sondeos sirvieron para tener información de la estratigrafía y de las propiedades mecánicas del subsuelo de la zona del lago, así como la finalidad de estudiar los diversos métodos de construcción para la formación del lago "Dr. Nabor Carrillo Flores". fig. 4.

a).- El BNP-1, está localizado a un lado del camino Peñón Texcoco y en las cercanías de la zona escogida para estudiar los diferentes métodos de construcción de lagos.

b).- El BNP-2, se localizó dentro de la zona de Sosa Texcoco,

c).- El BNP-3, en un punto intermedio de los dos anteriores tanto el BNP-2 como el BNP-3 se encuentran sobre la línea sísmica base.

Para el muestreo de suelos se emplearon tubos muestreadores Shelby de pared delgada de 10 cm., de diámetro en suelos blandos y el Denison para obtener muestras del mismo diámetro en mantos duros.

Los ensayos de laboratorio que se realizaron en las muestras fueron para determinar:

a).- Propiedades Índice: Contenido de Agua, Relación de Vacíos, Densidad de Sólidos y Límites Líquido y Plástico.

b).- Resistencia al Corte: Prueba de Torcómetro, compresión Triaxial Rápida y ensayos con Veleta de Laboratorio.

c).- Compresibilidad: Pruebas de Consolidación Unidimensional y Tridimensional.

d).--Ensayes de Permeabilidad: Horizontal y Vertical, este tipo de ensayos sólo se realizó en el BNP-1.

3.1.3).- Sondeos: S-1, S-4, S-5 y S-6.

El sondeo S-1 tuvo una profundidad de 52.50 m. y se localiza en el lago de prueba adyacente al camino Peñón-Textcoco así a las muestras logradas se les determinó su contenido natural de agua y límites de consistencia, los análisis se compararon con los obtenidos del sondeo BNP-1 resultando similares. Además se realizaron pruebas con veleta en zonas cercanas a las perforaciones para determinar la resistencia al corte de las arcillas.

El S-4 se llevó hasta 80 m. de pro-

fundidad localizándose en la parte norte del lago; los dos restantes S-5 y S-6 se perforaron a 90 y 100 m. de profundidad respectivamente y se localizaron en la región oriente cerca de Texcoco fig. 4. Las perforaciones fueron de clasificación e identificación para determinar el corte estratigráfico del lago.

3.1.4).- Sondeos S-6, S-9 y S-10.

Estos sondeos fueron ejecutados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, para estudios de ampliación del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México fig. 5.

3.2.- Exploración del Subsuelo en la Zona del Lago "Dr. Nabor Carrillo Flores"

Con el fin de conocer la estratigrafía de la zona del lago "Dr. Nabor Carrillo Flores" se realizaron estudios de exploración del subsuelo. Esta exploración consistió en cuatro sondeos de penetración estándar y de un sondeo inalterado, en la fig. 5 se muestra la ubicación de los sondeos.

3.2.1.)- Descripción de los Sondeos de Penetración Estándar SP-1, Sp-2, Sp-3 y SP-4.

a).- El sondeo SP-1 fué el primero del estudio que se realizó a principios de marzo de 1972, pero los resultados obtenidos fueron poco confiables por lo que no se pudo determinar con precisión la estratigrafía de ese sondeo.

b).- Los sondeos SP-2 y 3, se lleva

ron hasta 70 m. de profundidad, respectivamente, utilizando muestreadores de penetración estandard de dimensiones convencionales y fundas de polietileno para la obtención de muestras representativas. En mayo de 1972 se terminó el sondeo SP-4 con una profundidad de 70.2 m y su procedimiento de realización como sus resultados fueron similares al anterior. Así mismo a las muestras obtenidas de los sondeos se le determinaron las siguientes propiedades índice: Contenido de Agua, Límites Líquido y Plástico.

La clasificación de los suelos se hizo a partir de pruebas manuales y visuales del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), verificándola con los valores de plasticidad en laboratorio.

3.3.- Características del Subsuelo en la zona del Lago "Dr. Nabor Carrillo Flores"

Se determinó con detalle, que el subsuelo del lago "Dr. Nabor Carrillo Flores", presenta características generales semejantes a las determinadas por otros sondeos cercanos mencionados anteriormente.

De los resultados de estos sondeos se establece que la estratigrafía está constituida de la siguiente manera en orden de profundidad: Capa superficial, Formación Arcillosa Superior, Capa Dura, Formación Arcillosa Inferior y Depósitos Profundos, intercaladas entre las formaciones arcillosas existen capas delgadas y lentes permeables constituidas por arena, limos, vidrio volcánico y microfósiles de naturaleza calcárea.

En el sondeo SP-3 se destaca la existencia de una capa de 0.60 m. de espesor, formada en su totalidad por diatomas localizada a 56 m de profundidad, observándose bajo contenido de diatomeas en otros lentes.

Se observó que la capa dura es de baja compacidad y su espesor varía de 0.50 m. en el Este de la sección 1 a 2.0 m. al Oeste de la sección 5.

En el sondeo SP-4 predominan capas de arena y limos compactas, con bajos contenidos de agua, el contenido de agua medio calculado a partir de los sondeos SP-1 a SP-4 es de 378 % para la Formación Arcillosa Superior y de 295 % para la Inferior.

En la tabla 1 se resume la profundidad, espesor y contenido de agua medio de las capas que constituyen el subsuelo en los sondeos SP-1 a SP-4.

Se observó que la profundidad de los depósitos profundos varía de 52.60 m. en el sondeo SP-4 a 46.55 m. en el SP-2, siendo probable que disminuya la profundidad hacia el oriente del lago.

3.3.1.)- Sondeo Inalterado SI-1 en el Lago "Dr. Nabor Carrillo Flores"

El siguiente estudio realizado en el subsuelo del lago "Dr. Nabor Carrillo Flores" fué el sondeo inalterado SI-1, que complementa la información de las perforaciones SP-1 a SP-4.

La profundidad máxima a la que se llevó el sondeo fué de 56.24 m. atravezando las diferentes formaciones características de la zona del lago y penetrando aproximadamente 7.0 m. en los depósitos profundos.

Los ensayos de laboratorio que se realizaron en las muestras además de la clasificación manual y visual de campo basada en el (SUCS), sirvieron para determinar:

- a) Contenido Natural de Agua (En Muestras Alteradas e Inalteradas)
- b) Límites de Consistencia (Líquido y Plástico). (En Muestras Alteradas e Inalteradas).
- c) Resistencia a la Compresión Simple. (En Muestras Inalteradas).
- d) Características de Compresibilidad en Pruebas de Consolidación Unidimensional. (En Muestras Inalteradas).

e) Densidad de Sólidos, Relación de vacíos, Peso Volumétrico y Grado de Saturación para las muestras utilizadas en los incisos c y d.

3.4.- Estratigrafía de la Zona donde se localiza el Lago "Dr. Nabor Carrillo Flores" - en Base al Sondeo Inalterado SI-1.

3.4.1.) - Manto Superficial.

En la parte superior del sondeo se-

encontraron suelos limosos de baja compresibilidad, con un contenido de agua del orden de 123.9 %, debido al secado superficial del lago.

3.4.2).- Formación Arcillosa Superior.

Está integrada por arcillas de alta compresibilidad de consistencia suave, presentan lentes y estratos delgados de arenas finas limpias y limosnas, vidrio volcánico así como una gran cantidad de microfósiles. Estas arcillas tienen un contenido de agua medio de 360.2%, densidad de sólidos de 2.41, relación de vacíos de 8.05, peso volumétrico de 1.18 ton/m³ y su resistencia en prueba de compresión simple no confinada presenta un valor medio de 0.16 kg/cm².

3.4.3).- Capa Dura.

Esta capa está constituida por suelos limosos y limo arenosos de color gris verdoso, además contiene también lentes de vidrio volcánico. El contenido de agua medio fué de 73.6%, la densidad de sólidos de 2.44, relación de vacíos de 1.72, peso volumétrico de 1.53 ton/m³, y la resistencia en prueba de compresión no confinada fué de 0.53 kg/cm².

3.4.4).- Formación Arcillosa Inferior.

Esta formación está constituida por arcillas de alta compresibilidad y consistencia muy blanda, contiene lentes y estratos de arena fina y de vidrio volcánico, intercalados en todo su espesor, también presenta microfósiles. Su contenido de agua medio fué de -

302.9 % la densidad de sólidos de 2.39, relación de vacíos de 6.48 y el peso volumétrico 1.20 ton/m³, el valor medio de resistencia en la prueba de compresión simple, no confinada, fué de 0.27 kg/cm².

3.4.5).- Depósitos Profundos.

Estos depósitos están constituidos por intercalaciones de lentes y estratos delgados de limos, arenas, limos arenosos y vidrio-volcánico. El contenido medio de agua fué de 49.9 %.

En la tabla 2 se muestran los valores medios de las diferentes propiedades índice y mecánicas, y en la tabla 3 se resumen los valores de compresibilidad determinados en pruebas de consolidación unidimensional.

3.5.- Sondeos Profundos Complementarios del Lago. "Dr. Nabor Carrillo Flores"

En el año de 1976 en las secciones 1 y 2 del lago "Dr. Nabor Carrillo Flores" se realizaron cuatro sondeos profundos: SPC-1, SPC-2, SPC-3 y SPC-4 fig. 6, que complementan a los sondeos realizados anteriormente en la propia zona, obteniéndose información detallada de la estratigrafía y de las propiedades del subsuelo, específicamente de los depósitos profundos.

La profundidad de los sondeos realizados fué la siguiente:

Sondeo	Profundidad	Prof. N.A.F.
SPC-1	80.10	1.35

SPC-2	79.95	1.60
SPC-3	147.60	1.10
SPC-4	150.23	1.10

Durante la ejecución de los sondeos se obtuvieron muestras con penetrómetro de 61-cm. de longitud, 5 cm. de diámetro exterior, a 3.5 cm. de diámetro interior, hincado dinámicamente con un martinete de 63.5 kg. de peso.

A las muestras extraídas se les clasisificó manual y visualmente de acuerdo a los procedimientos establecidos por el (SUCS); se les determinó el contenido natural de agua, los límites de consistencia, líquido y plás-tico, composición granulométrica por mallas, porcentaje de partículas finas menores de 0.074 mm. y densidad de sólidos.

La estratigrafía y propiedades del subsuelo del sondeo SPC-4 representativo de las perforaciones complementarias, se muestra en la fig. 7.

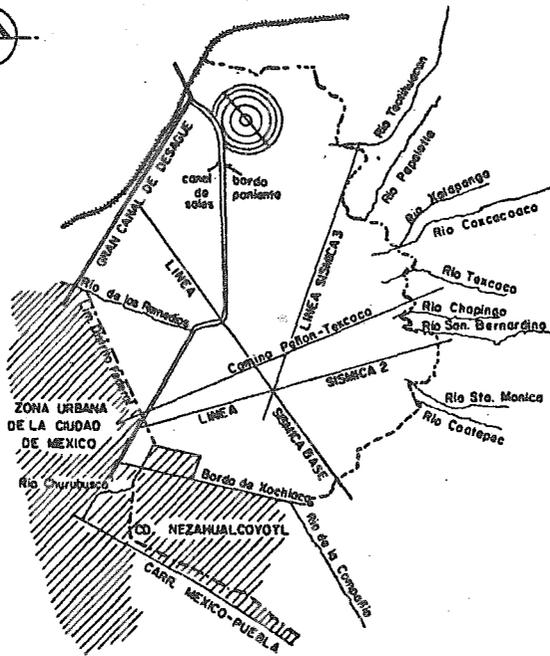
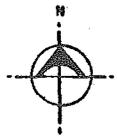


FIGURA 2 PLANO DE LOCALIZACION DE LINEAS SISMICAS

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

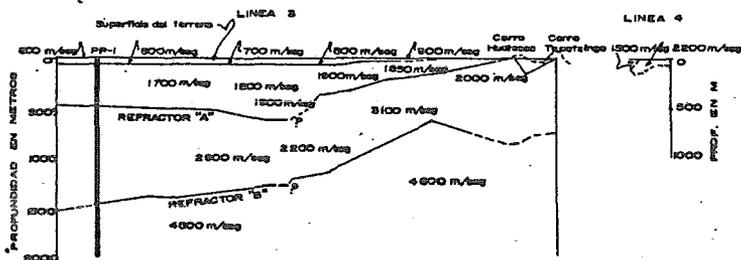
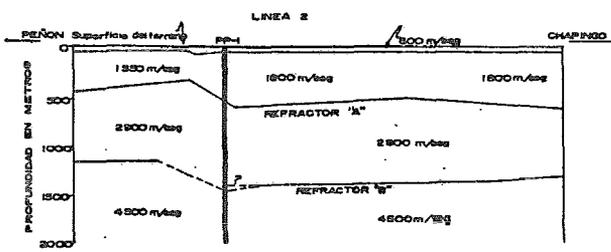
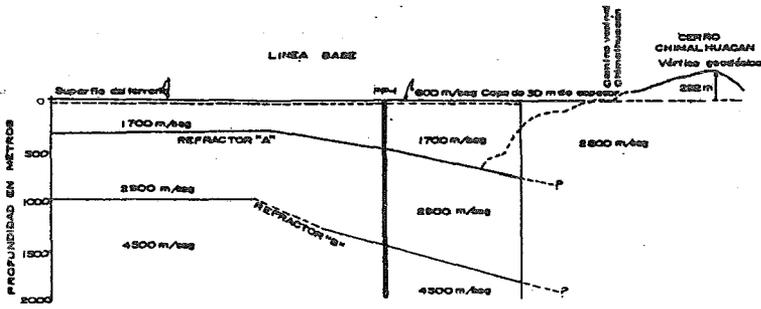


FIGURA 3 EXPLORACIÓN SISMICA—PERFILES DE REFRACCION EN LAS LINEAS: BASE, 2, 3 y 4

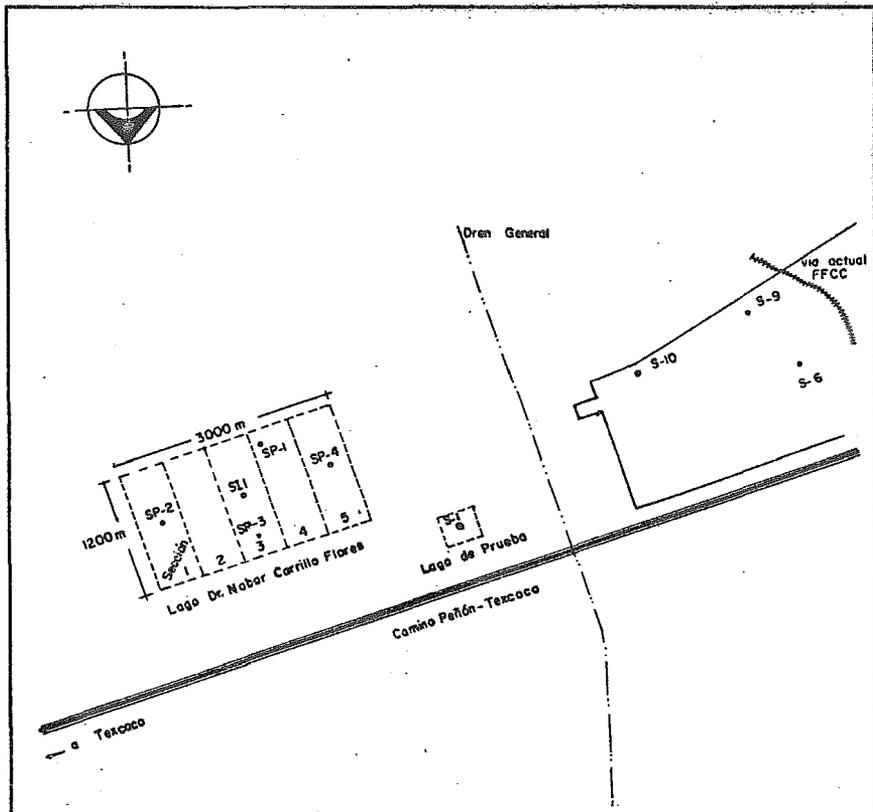


FIGURA 5 LOCALIZACION DE SONDEOS EN EL LAGO DR. NABOR CARRILLO FLORES Y SITIOS CERCANOS

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

T A B L A 1

PROFUNDIDAD, ESPESOR Y CONTENIDO DE AGUA MEDIO DE LAS CAPAS QUE CONSTITUYEN EL
SUBSUELO EN LOS SONDEOS SP-1 a AP-4

Sondeo	Capa	Prof. m		Espesor en m.	W %
		de	a		
SP-1	Manto Superficial (M.S)	0	2.00	2.00	49
	Formación Arcillosa Superior (F.A.S.)	2.00	32.80	30.80	364
	Capa Dura (C.P)	32.80	34.50	1.70	180
	Formación Arcillosa Inferior (F.A.I.)	34.50	51.80	17.30	311
	Depósitos Profundos (D.P.)	51.80	--	--	variable
SP-2	(M.S.)	no definida		--	--
	(F.A.S)	0	30.50	30.50	396
	(C.D.)	30.50	30.80	0.30	59
	(F.A.I.)	30.80	46.55	15.75	301
	(D.P.)	46.55	--	--	variable
SP-3	(M.S.)	0	0.60	0.60	35
	(F.A.S.)	0.60	31.30	30.70	364
	(C.D.)	31.30	32.65	1.35	95
	(F.A.I.)	32.65	47.80	15.15	293
	(D.P.)	47.80	--	--	variable
SP-4	(M.S.)	0	1.80	1.80	70
	(F.A.S.)	1.80	33.30	31.50	388
	(C.D.)	33.30	34.20	0.90	81
	(F.A.I.)	34.20	52.40	18.40	276
	(D.P.)	52.40	--	--	35

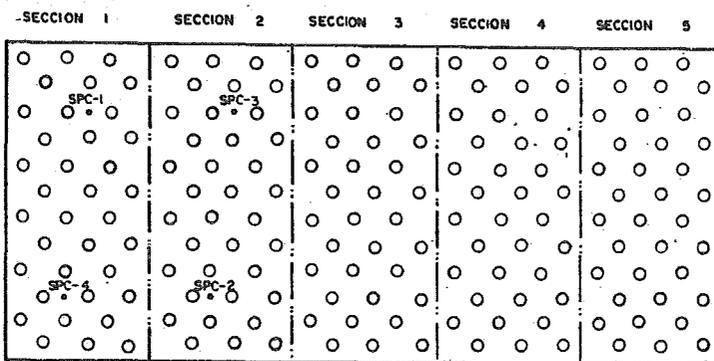
T A B L A 2

VALORES MEDIOS DE LAS PROPIEDADES INDICE Y MECANICAS PARA LAS DIFERENTES
CAPAS PRESENTES EN EL SONDEO SI1

Capa	Prof.m de	a	W %	Ss	e	γ_m ton/m ³	Squ kg/cm ²
Manto Superficial	0	0.40	123.9	-	-	-	-
Formación Arcillo- sa Superior	0.40	31.70	360.2	2.41	8.05	1.18	0.16
Capa Dura	31.70	32.80	73.6	2.44	1.72	1.53	0.53
Formación Arcillo- sa Inferior	32.80	48.80	302.9	2.39	6.48	1.20	0.27
Depósitos Pro- fundos	48.80	-	49.9	-	-	-	-

T A B L A 3
RESUMEN DE LAS CARACTERISTICAS DE COMPRESIBILIDAD
DEL SONDEO SI1

Profundidad m	Ss	ei	wi %	Coef. de compresibilidad a_v max (cm ² /kg)	Presión para a_v max (kg/cm ²)	Intervalo de preconsolidación (kg/cm ²)
3.33	2.39	10.25	423.8	3.4	0.54	----
8.28	2.26	10.14	453.5	7.0	0.67	0.51 - 0.57
12.78	2.24	10.45	467.5	7.4	0.64	0.52 - 0.57
19.69	2.42	10.30	423.7	4.2	0.60	0.51 - 0.56
25.13	2.30	10.00	442.2	4.0	0.65	0.55 - 0.61
29.63	2.41	10.06	413.0	2.9	0.93	0.74 - 0.86
34.78	2.27	11.18	499.2	3.4	1.27	0.95 - 1.06
38.83	2.29	6.20	268.9	1.2	1.90	1.40 - 1.65
42.88	2.36	10.10	431.1	2.4	1.35	1.15 - 1.32
46.98	2.34	5.01	215.2	0.8	2.50	1.80 - 2.15



- POZO DE BOMBEO
- SONDEO DE PENETRACION ESTANDAR COMPLEMENTARIO

FIGURA 6 LOCALIZACION DE SONDEOS COMPLEMENTARIOS

EN EL LAGO DR. NABOR CARRILLO FLORES

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

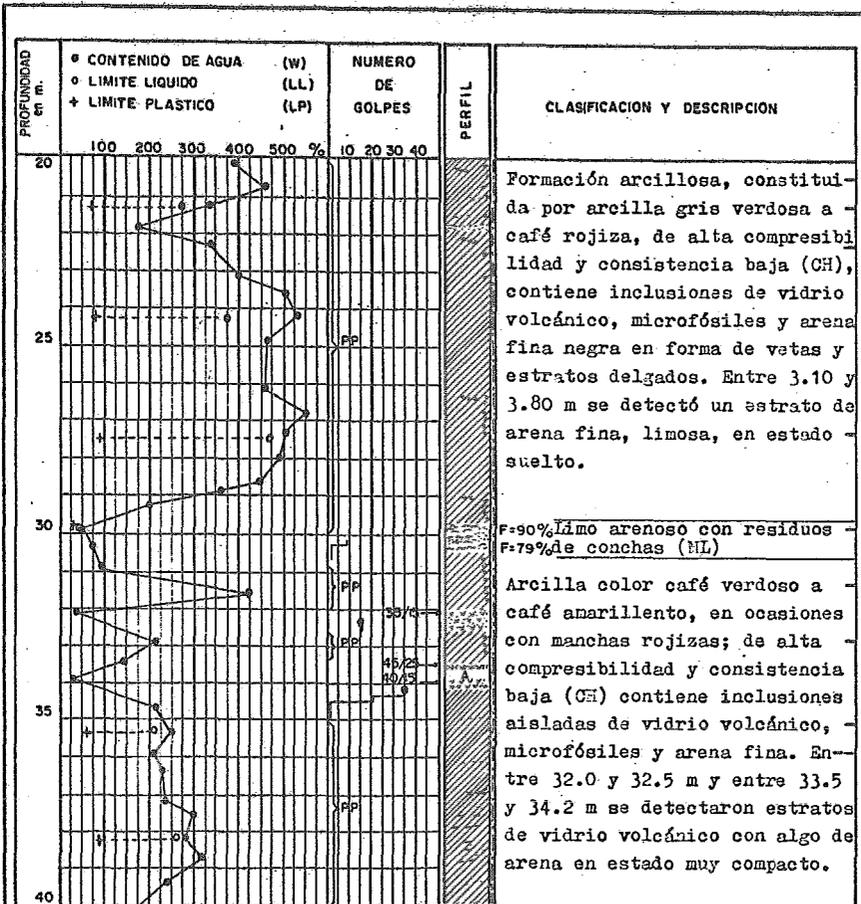


FIGURA 7 ESTRATIGRAFIA Y
 PROPIEDADES DEL SUBSUELO
 EN EL SONDEO SP4 - NCF (Continúa)

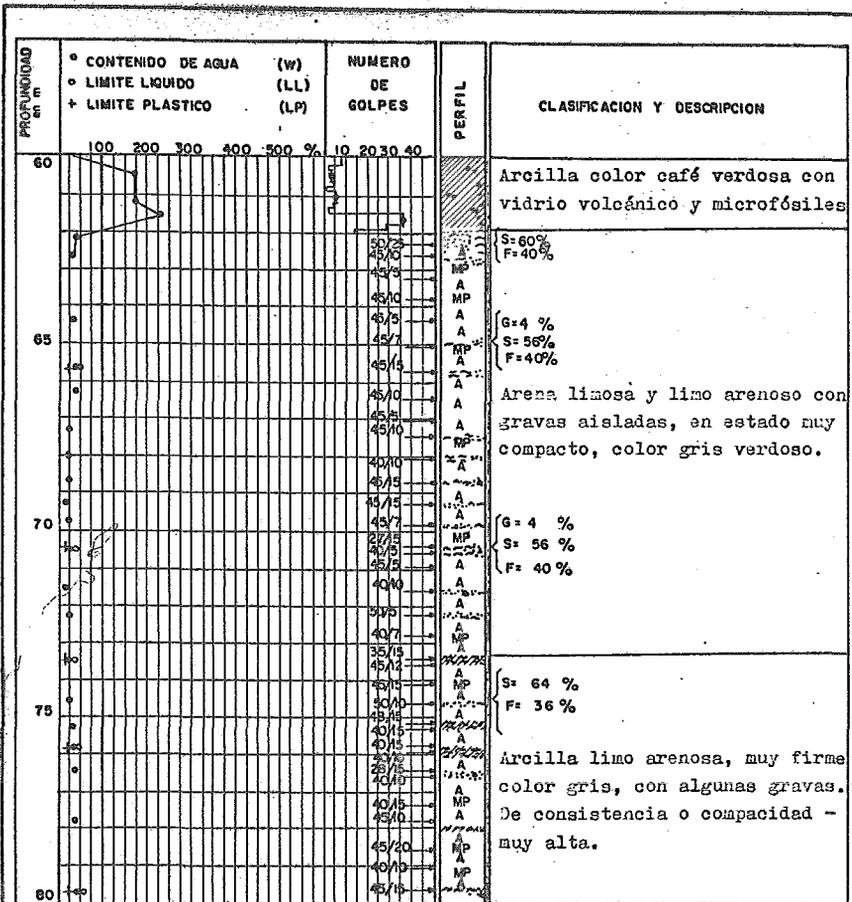


FIGURA 7 ESTRATIGRAFIA Y PROPIEDADES DEL SUBSUELO EN EL SONDEO SP4 - N.C.F. (Continúa)

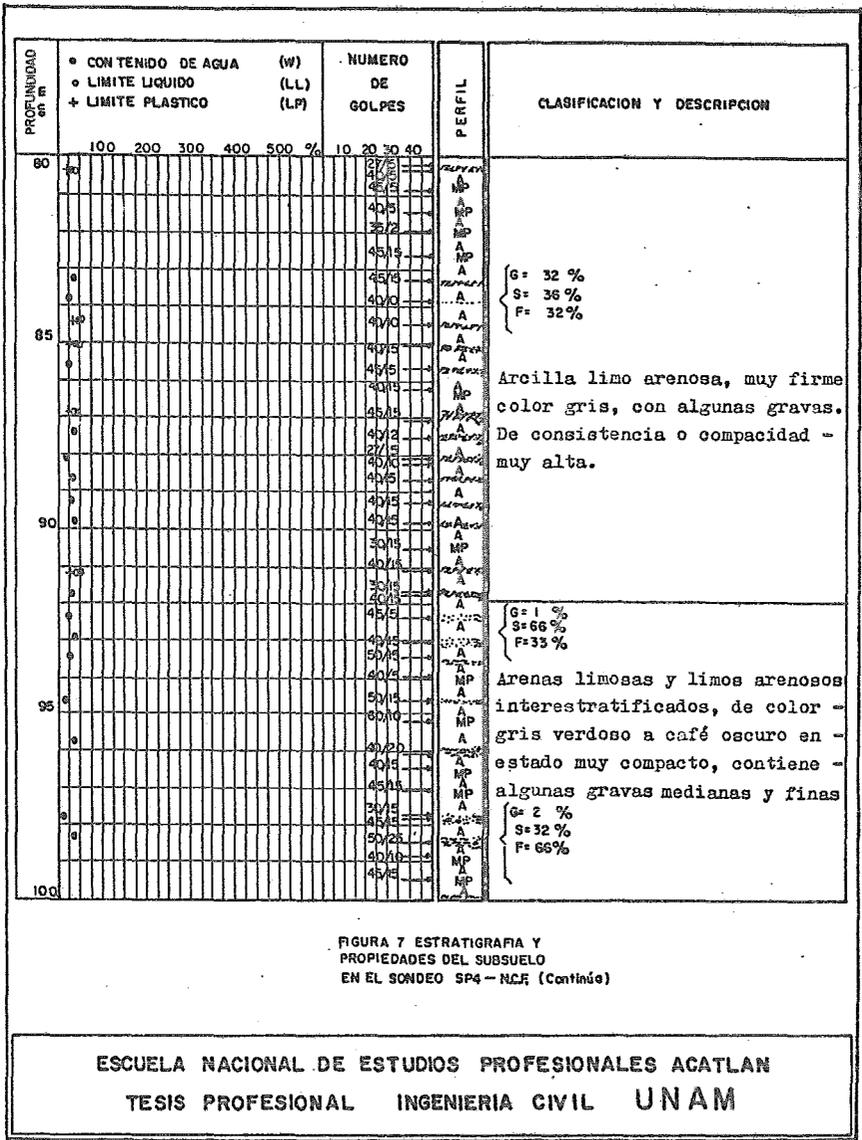


FIGURA 7 ESTRATIGRAFIA Y PROPIEDADES DEL SUBSUELO EN EL SONDEO SP4 - NCF (Continúe)

PROFUNDIDAD en m.	CONTENIDO DE AGUA (W)					LIMITE LIQUIDO (LL)		LIMITE PLASTICO (LP)		NUMERO DE GOLPES	TIPO DE SUELO	CLASIFICACION Y DESCRIPCION
	100	200	300	400	500 %	10	20	30	40			
100										50/45	A	Arenas limosas y limos arenosos interestratificados, de color - gris verdoso a café oscuro, en estado muy compacto, contiene - algunas gravas medianas y finas G= 5% S= 65% F= 30%
										35/5	MP	
										30/5	A	
										45/6	MP	
										45/6	A	
										35/0	A	
105										35/0	A	
										35/0	MP	
										35/7	A	
										35/3	MP	
										35/3	A	
										30/4	MP	
										40/5	A	
										35/5	A	
										35/5	A	
										35/7	MP	
110										40/6	A	
										35/5	MP	
										35/3	A	
										35/7	MP	
										25/4	A	
										35/5	MP	
										35/4	A	
										35/4	A	
										35/7	MP	
115										35/2	A	
										35/5	MP	
										35/5	A	
										30/3	MP	
										35/4	A	
										35/4	MP	
										35/6	A	
										30/2	MP	
										35/3	A	
										35/5	MP	
120										35/12	A	

FIGURA 7 ESTRATIGRAFIA Y PROPIEDADES DEL SUBSUELO EN EL SONDEO SP4 - NCE (Continúa)

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

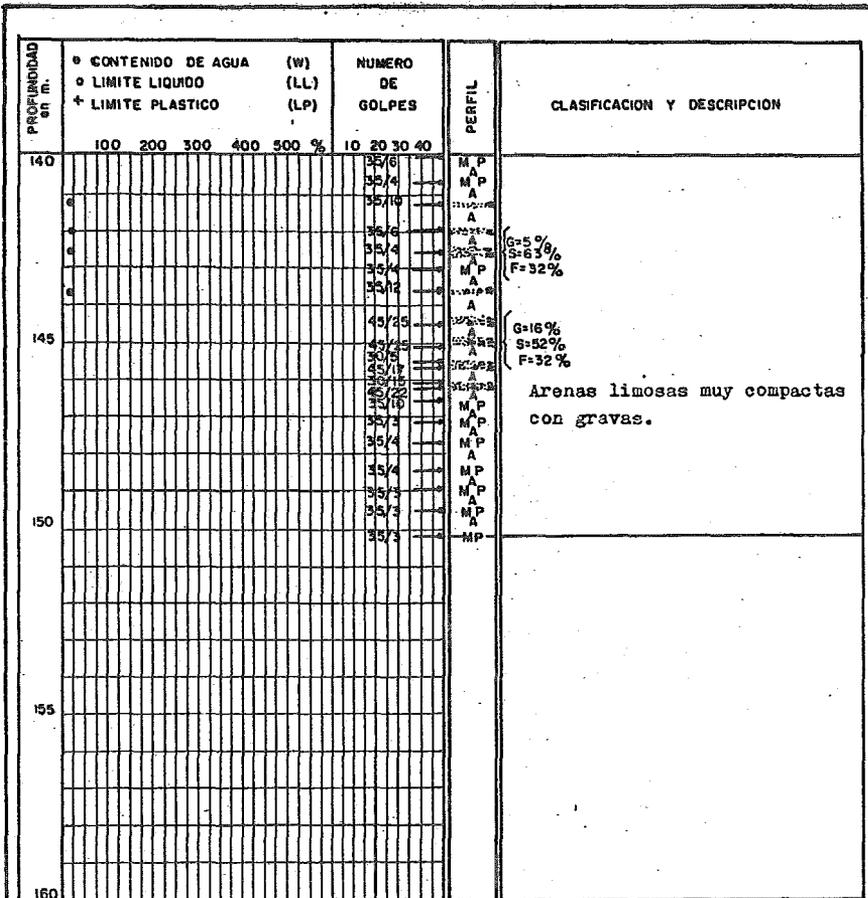


FIGURA 7 ESTRATIGRAFIA Y PROPIEDADES DEL SUBSUELO EN EL SONDEO SP4-NCF (Fin)

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

CAPITULO IV

INSTRUMENTACION

4.1.- Objetivo de la Instrumentación.

El objetivo principal que se persiguió instrumentando la zona del lago "Dr. Nabor Carrillo Flores" fué el de conocer la magnitud y evolución de los movimientos del subsuelo a fin de llevar un control durante el proceso de construcción del lago y comparar lo obtenido teóricamente en base a la Hipótesis de formación consideradas con lo observado en los dispositivos instalados en la zona.

4.2.- Instrumentación en el lago "Dr. Nabor Carrillo Flores".

Los aparatos empleados en la instrumentación se eligieron tomando en cuenta el comportamiento satisfactorio de los instalados en la zona de Texcoco por la SAHOP para los terraplenes de prueba construídos a un lado del camino Peñón-Texcoco, así como en la línea Férrea del Sur, y por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en el área prevista para la ampliación del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. En la fig. 8 se muestra la ubicación de los dispositivos de observación que se instalaron en el área del lago "Dr. Nabor Carrillo Flores" y que a continuación se describen:

a).- Testigos Superficiales.

Fueron distribuídos en un área de 8.8 km² con una separación de 200 m. dentro de las secciones 1 a 5 y fuera de ella entre 200- y 400 m. mismos que sirvieron para conocer los

hundimientos de la superficie del terreno y su evolución con el tiempo. En la fig. 9 se presenta el tipo de banco instalado.

b).- Piezómetros Abiertos del Tipo Casagrande.

Se instalaron nueve estaciones piezométricas: EP-1 a EP-9 ubicándose una en el centro de las secciones 1, 4 y 5, dos en la sección 2 y cuatro en la 3, con la distribución que se aprecia en la fig. 8, en la fig. 10 se muestra el tipo de piezómetro instalado.

Los piezómetros se colocaron en la formación arcillosa superior, en la capa dura y en los depósitos profundos según fig. 11 y son para conocer la evolución de la presión del agua en éstas dos últimas formaciones. En la tabla 4 se muestra la profundidad a la que están instalados los piezómetros.

c).- Bancos de Nivel Profundo.

Se localizaron en el centro de las secciones 1, 3 y 5 y se denominaron estaciones BP-1, BP-2 y BP-3 respectivamente, cada una de las estaciones contó con dos bancos uno apoyado en la capa dura y otro en los depósitos profundos. En la tabla 5 se muestra la profundidad a que se encuentran instalados y en la fig. 12 el tipo de banco instalado.

Estos bancos sirvieron para medir la deformación por consolidación de cada uno de los estratos comprensibles situados entre la superficie y el horizonte superior de los depósitos profundos así como para poder establecer su contribución de cada uno de

ellos en los hundimientos totales,

d).- Inclínómetro.

El tipo de aparato usado fué el Slope-Indicator con tubería ranurada de aluminio fig. 13 instalándose 6 dispositivos, 3 en el lado corto del área mostrada en la fig. 8 y 3 en el lado largo de la misma superficie. La instalación se llevó hasta los depósitos profundos con el fin de determinar los desplazamientos horizontales producidos en el medio-afectado por el hundimiento. En la tabla 6 se presenta la profundidad a la que fueron instalados los aparatos.

4.3.- Comportamiento Observado.

a).- Asentamientos Superficiales.

En el mes de marzo de 1973, tres meses después del inicio del bombeo, se observaron hundimientos hasta de 33 cm. en las líneas centrales H y 14 según se aprecia en las figs. 14 y 15, además se observó que las secciones 1, 2 y 3 registraban una mayor velocidad de hundimiento el cual era de 11 cm. por mes.

En enero de 1977 después de 5 años de un continuo bombeo en el lugar, las secciones 3, 4 y 5 de la línea central H registraron los mayores hundimientos.

A esa fecha el volumen de almacenamiento generado era de 9.654 millones de metros cúbicos, lo que representa un hundimiento medio de 2.15 m. con una velocidad de hundimiento de 4.39 cm. por mes.

La elevación que presentaba en ese año, el testigo más bajo del lago cuya elevación era de 2231.81 m.s.n.m. se compara con algunos puntos del área Metropolitana y del lago de Texcoco:

Catedral Metropolitana	2234.13	m.s.n.m. (1973)	CAVM
		(1)	
Monumento Carlos IV	2231.5	m.s.n.m. (1973)	CAVM
		(1)	
Parte más baja de la Ciudad de México --	2231.0	m.s.n.m. (1973)	CAVM
		(1)	
Lecho del Lago de Texcoco..	2234.0	m.s.n.m. (1973)	CLT
		(2)	
Bordo Xochiaca	2235.0	m.s.n.m. (1975)	CLT
		(2)	
Bordo Poniente	2235.6	m.s.n.m. (1975)	CLT
		(2)	

(1) Comisión de Aguas del Valle de México.

(2) Comisión del Lago de Texcoco.

De acuerdo con los datos anteriores, el lecho inferior del lago "Dr. Nabor Carrillo Flores" estaba aproximadamente a 0.81 m. arriba del punto más bajo de la Ciudad de México.

En el mes de octubre de 1978 en el lago "Dr. Nabor Carrillo Flores" se suspendió el bombeo habiéndose registrado un hundimiento de 3.49 m, y se observó que la magnitud de los

hundimientos generados fuera de la zona de bombeo fueron poco apreciables y el volumen de almacenamiento generado por los hundimientos en el área comprendida entre los ejes D a K y 6 a 22 era de 10. 143 millones de metros cúbicos, lo que representa un hundimiento medio de 2.26 m. con una velocidad de hundimiento de 3.3 cm. por mes. La elevación del punto más bajo del lecho del lago quedó a sólo 52 cm. arriba del punto más bajo de la Ciudad de México.

En junio de 1979 se observó que la velocidad de hundimiento fué nula, registrándose recuperaciones del orden de 19 cm. en algunas zonas del lago.

b).- Piezometría.

La evolución de los abatimientos piezométricos tanto en la capa dura como en los depósitos profundos se muestra en la fig. 16.

Capa Dura. En los registros observados en junio de 1972 siete meses antes del comienzo del bombeo la elevación piezométrica de esta capa coincidía prácticamente con el nivel freático, teniendo una presión de poro de 32 ton/m².

En el mes de marzo de 1973, los piezómetros colocados en la capa dura, presentaban un abatimiento en la presión de 3 ton/m² en las secciones 1, 3, 4 y 5 y en la 2 de 1.50 ton/m² aproximadamente, en el transcurso de marzo a enero de 1974 los descensos de la presión piezométrica promedio fueron del orden de 5 ton/m² y en los años de 1975, 1976 y 1977 de 3 ton/m² aproximadamente.

En octubre de 1978 fecha de suspensión del bombeo la presión piezométrica se recuperó en 3.5 ton/m² para las secciones 1 y 2 y en 4 ton/m² en las secciones 3, 4 y 5 para el último registro que se realizó en junio de 1972 la recuperación fué de 2.5 ton/m², llegando finalmente a una presión piezométrica de 30 ton/m².

Depósitos Profundos: La presión de poro registrada en junio de 1972 para esta capa permeable fué de 41 ton/m², y para marzo de 1973 descendió en 9 ton/m² en la sección 1, 3.5 ton/m² en la 2, 16.50 ton/m² en la 3, y en las secciones 4 y 5 la presión aumentó en 1.5-ton/ m².

Para los años de 1975, 1976, 1977 se observó un continuo descenso en la presión a medida que se bombea la zona del lago, también se apreciaron recuperaciones de estas presiones en algunas secciones, esto se debió a que al fallar las bombas se dejaba de bombear y esto ocasionaba que se recuperaran las presiones piezométricas, registrándose para octubre de 1978 una recuperación de aproximadamente 4.5 ton/m² en las secciones 1 y 2 y de 18 ton/m² en las secciones 3, 4 y 5 y para el último registro realizado en junio de 1972 se obtuvo una recuperación de 2 ton/m², tomando una presión final de 38.5 ton/m² promedio para éstos depósitos.

Las recuperaciones en las presiones de poro tanto en la Capa Dura como en los Depósitos Profundos al final del bombeo provocó recuperaciones en el área de bombeo del orden de 19 cm.

c).- Enjutamiento en las Formaciones Arcillosas Superior e Inferior.

La evolución de los hundimientos en las formaciones arcillosas Superior e Inferior, registradas por las tres estaciones BP-1, BP-2 y BP-3 se muestran en la fig. 17, se observa que las dos formaciones desde el inicio de bombeo hasta mayo de 1974 han mantenido un enjutamiento casi constante y la contribución de cada una de las formaciones compresibles al asentamiento total fué la siguiente:

	Sección 1	Sección 3	Sección 5
F.A.S.	31.6%	15.3 %	15.8 %
F.A.I.	61.8%	80.3 %	87.7 %
D.P.	6.6 %	4.4 %	6.5 %

Lo cual indica que los volúmenes de almacenamiento registrados han sido obtenidos esencialmente de la Formación Arcillosa Inferior y que la contribución de la Formación Arcillosa Superior ha sido hasta esta fecha de menor importancia.

En el lapso comprendido entre el mes de mayo de 1974 y julio de 1976, las Formaciones Arcillosas Superior e Inferior se comprimieron a una velocidad constante, disminuyendo en forma gradual para el año de 1978.

La contribución de cada una de las formaciones compresibles al hundimiento total realizada en Julio de 1976, fué la siguiente:

	Sección 1	Sección 3	Sección 5
F.A.S.	25.7 %	15.3 %	14.1 %
F.A.I.	60.4 %	70.8 %	72.7 %
DP	13.9 %	13.9 %	13.2 %

Los porcentajes nos vuelven a indicar que, los volúmenes de almacenamiento se deben fundamentalmente a la consolidación de la Formación Arcillosa Inferior y que la Contribución de los Depósitos Profundos es notablemente menor. Lo cual se explica si se tiene en cuenta que la formación Arcillosa Inferior tiene dos fronteras permeables por donde está siendo drenada y la Formación Arcillosa Superior únicamente una.

Por otra parte, las exploraciones han confirmado la existencia en toda el área de una tercera Formación Arcillosa que subyace los estratos permeables, localizados entre 47- y 60 m. de profundidad.

La evolución de ~~compresión~~ ^{hundimiento} continuó hasta marzo de 1978, y a partir de esa fecha a junio de 1979 las velocidades de hundimiento fueron prácticamente nulas.

La contribución en por ciento de cada una de las formaciones compresibles al hundimiento total hasta junio de 1978 fueron las siguientes:

	Sección 1	Sección 3	Sección 5
F.A.S.	27.1 %	17.6 %	16.3 %
F.A.I.	61.11%	77.4 %	72.1 %
D.P.	11.8 %	10.0 %	11,6 %

Esto nos demuestra que los asentamientos de almacenamiento se debieron fundamentalmente a la Formación Arcillosa Inferior y en menor proporción a los Depósitos Profundos.

En base a lo observado un banco de nivel profundo desplantado al centro de la formación arcillosa inferior (Cota 39 m), instalado en agosto de 1976 en la sección 3, se determinó que la mitad inferior de esa capa contribuyó con un 75 % aproximadamente de la contribución total de la Formación Arcillosa Inferior.

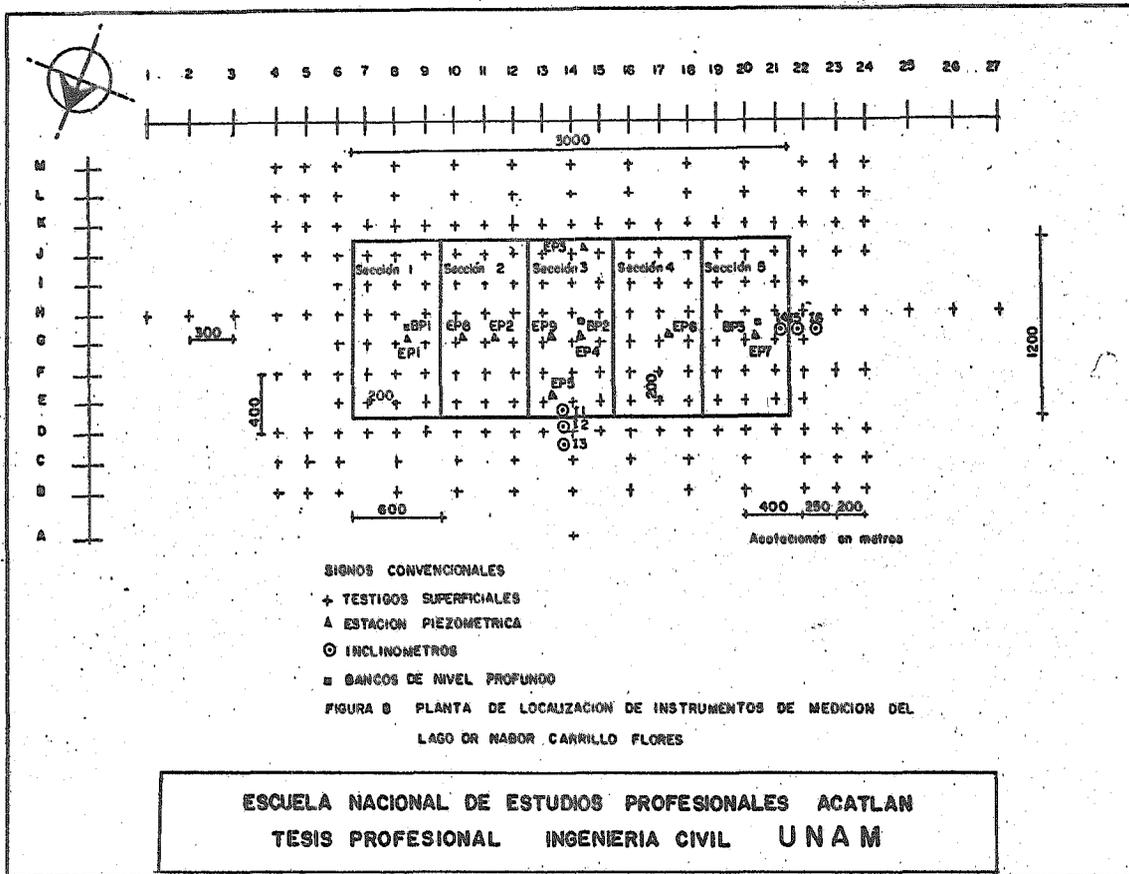
A continuación se reporta la contribución de la F.A.I. en por ciento de las mitades Superior e Inferior en el período comprendido del 16 de agosto de 1976 al 22 de junio de 1979.

Fecha	Mitad Superior	Mitad Inf.
16 de Agosto de 1976	33 %	65 %
9 de Agosto de 1977	26 %	74 %
3 de Octubre de 1978	20 %	72 %
22 de Junio de 1979	25 %	75 %

d).- Desplazamientos Horizontales.

Los desplazamientos de los inclinómetros I-2 e I-4 se muestran en las fig. 18 y 19 respectivamente. En éstas gráficas se observa que los movimientos se presentaron hacia el centro del lago. Los desplazamientos registrados en la superficie del terreno fueron del orden de 25 cm. para el I-2 y 20 Cm. para el I-4.

Se advierte que la magnitud de los desplazamientos horizontales decrecen con la profundidad, apreciándose movimientos de pequeña magnitud a partir de enero de 1977, fecha en que empezó a disminuir notablemente la velocidad de hundimiento en el lago. En junio de 1979 fecha del último registro que se realizó, se observaron movimientos de recuperación del orden de 5 cm. en los dos inclinómetros.



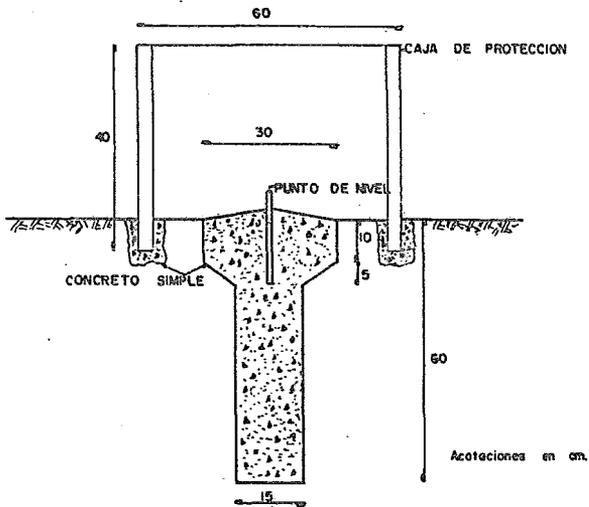


FIGURA 9 DETALLE DE UN BANCO DE NIVEL SUPERFICIAL

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

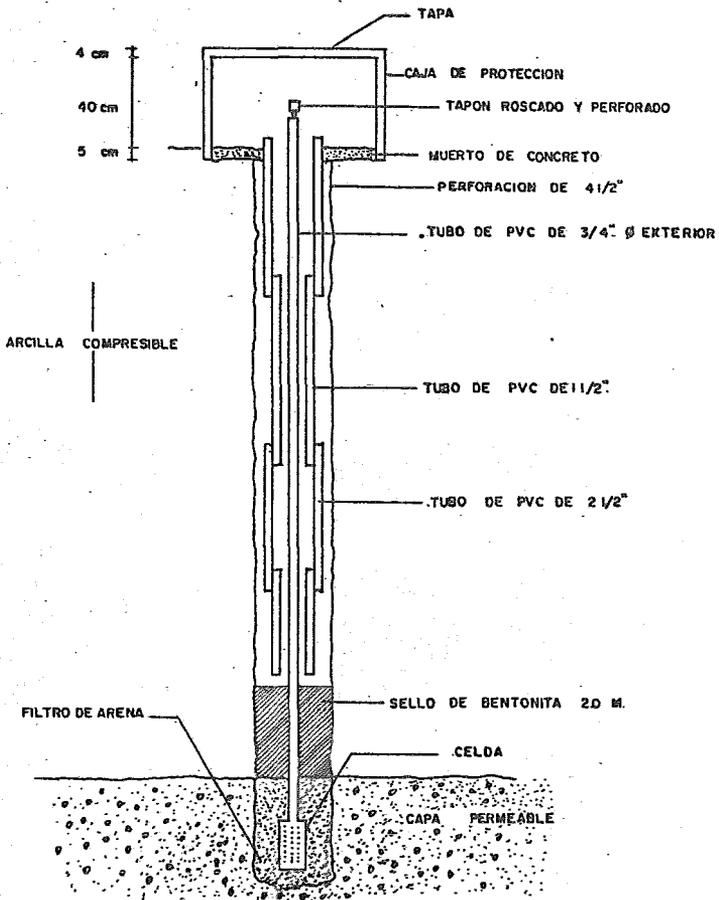


FIGURA 10 PIEZOMETRO ABIERTO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

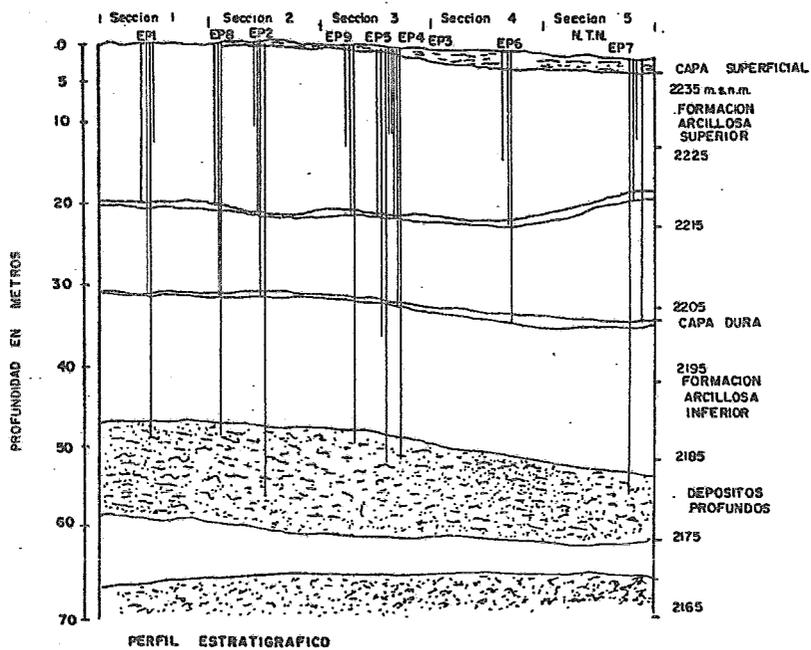


FIGURA II PERFIL DE LOCALIZACION PIEZOMETRICA

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

T A B L A 4.

PROFUNDIDAD Y ELEVACION SUPERFICIAL DE LOS PIEZOMETROS.

Estación	Piezómetro	Profundidad (m)	Elevación Superficial (m)	59
EP-1	P-1	12.00	2235.72	
	P-2	19.70	2235.75	
	P-3	33.45	2235.74	
	P-4	47.60	2235.76	
EP-2	P-1	12.00	2236.35	
	P-2	21.85	2236.40	
	P-3	31.90	2236.28	
	P-4	53.40	2236.27	
EP-3	P-1	12.00	2235.93	
	P-2	21.60	2235.80	
	P-3	33.20	2235.81	
	P-4	51.70	2235.84	
EP-4	P-1	12.00	2235.76	
	P-2	21.40	2235.71	
	P-3	32.10	2235.74	
	P-4	50.30	2235.70	
EP-5	P-1	12.00	2235.90	
	P-2	20.95	2235.89	
	P-3	35.60	2235.86	
	P-4	50.60	2235.87	
EP-6	P-1	12.00	2235.91	
	P-2	22.00	2235.83	
	P-3	33.45	2235.93	
	P-4	53.00	2235.91	
EP-7	P-1	12.00	2235.93	
	P-2	17.95	2235.95	
	P-3	34.00	2235.96	
	P-4	53.40	2235.84	
EP-8	P-1	12.00	2235.90	
	P-2	31.00	2235.87	
	P-3	49.90	2235.85	
EP-9	P-1	12.00	2235.86	
	P-2	32.00	2235.82	
	P-3	49.20	2235.86	

T A B L A 5

PROFUNDIDAD Y ELEVACION DE BANCOS DE NIVEL PROFUNDO

Estación	Banco	Profundidad (m)	Elevación Inicial junio 1972
BP-1	B1	30.50	2235.83
	B2	46.80	2235.97
BP-2	B1	32.20	2235.87
	B2	52.20	2235.96
BP-3	B1	33.45	2236.24
	B2	52.40	2236.10

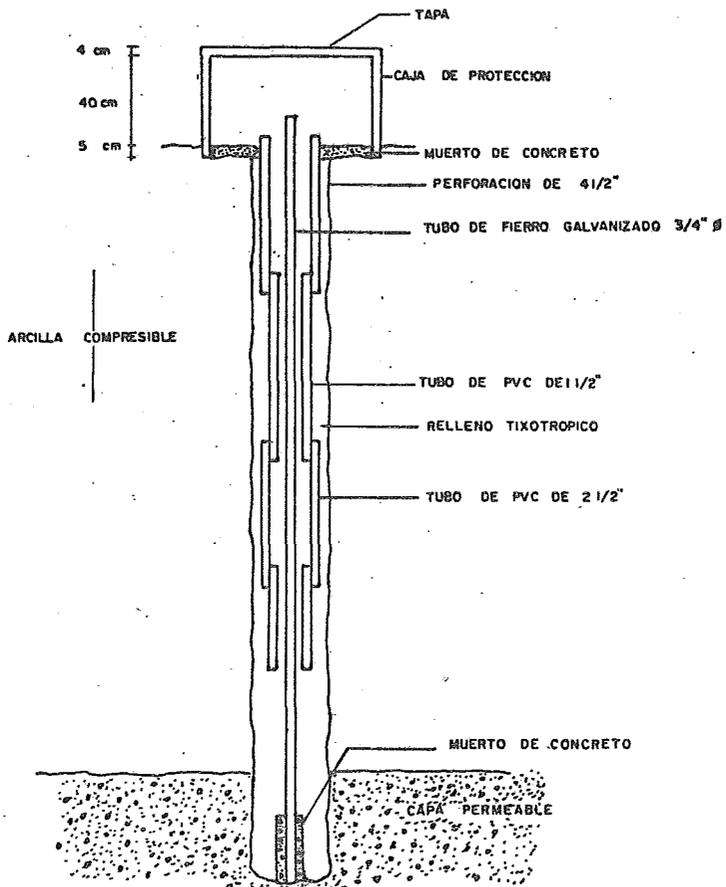


FIGURA 12 BANCO DE NIVEL PROFUNDO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

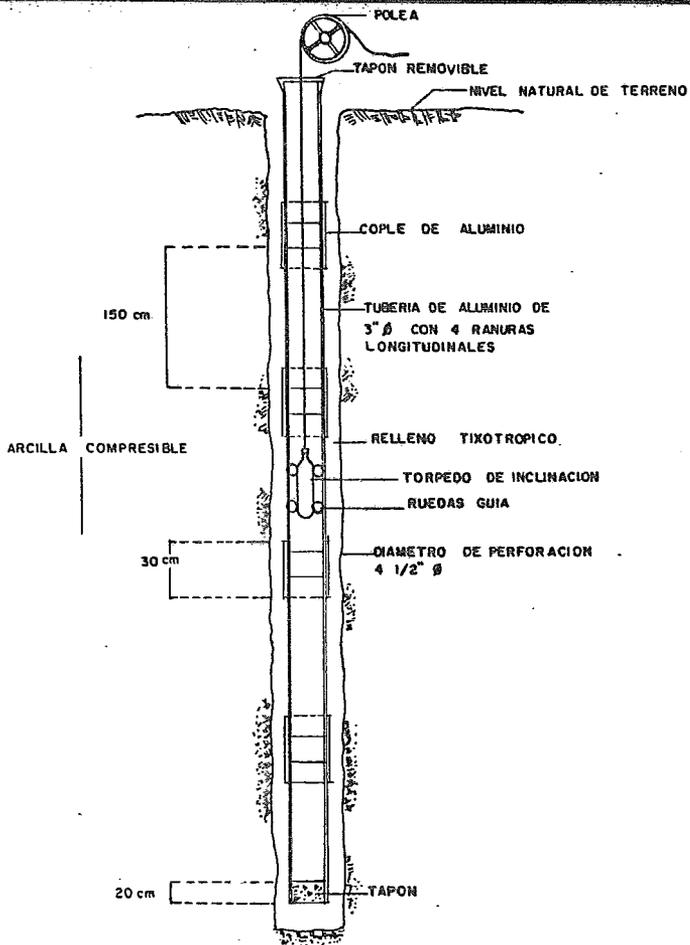
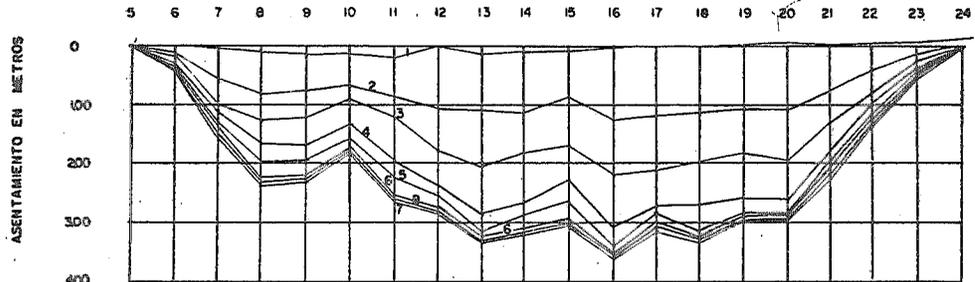


FIGURA 13 INCLINOMETRO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

T A B L A 6
LONGITUD Y ELEVACION SUPERFICIAL DE INCLINOMETROS

Inclinómetro	Longitud (m)	Elevación Inicial (m)
I1	49.93	2235.68
I2	50.28	2235.86
I3	50.04	2235.92
I4	54.80	2235.96
I5	54.20	2235.97
I6	54.85	2235.91



1	MARZO	1973	5	SEPTIEMBRE	1976
2	ENERO	1974	6	ENERO	1977
3	ENERO	1975	7	OCTUBRE	1978
4	ENERO	1976	8	JUNIO	1979

FIGURA 14 PERFILES DE ASENTAMIENTOS EN LA LINEA H

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN.
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

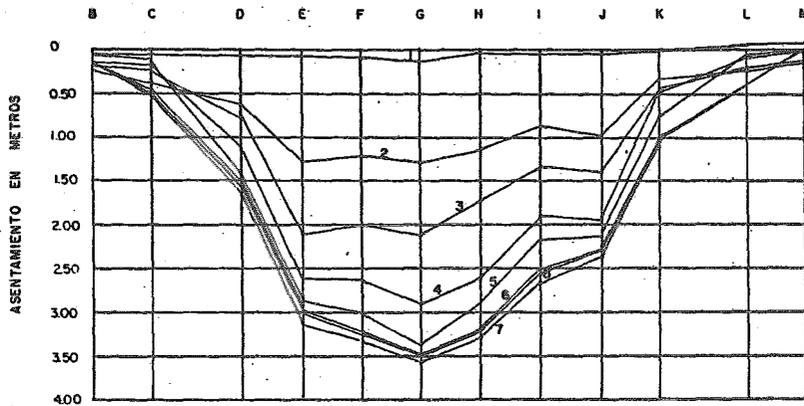
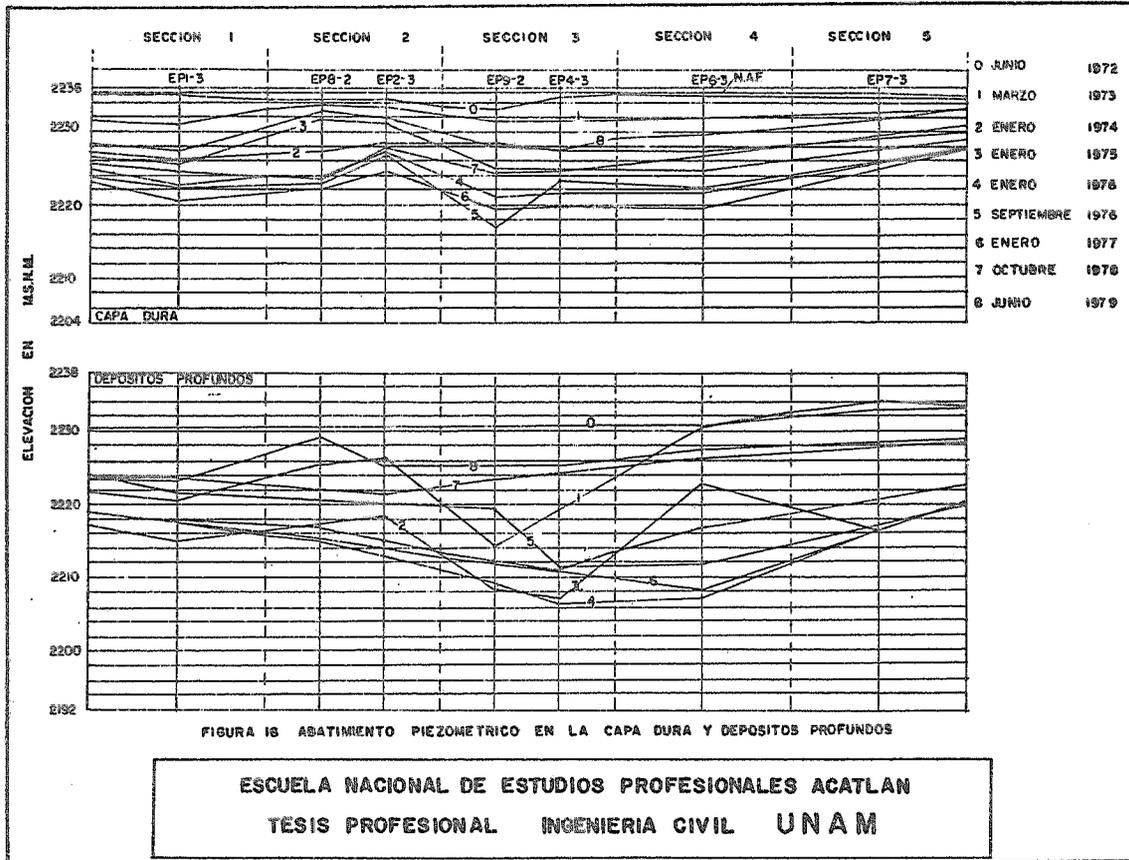


FIGURA 15 PERFILES DE ASENTAMIENTOS EN LA LINEA 14

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM



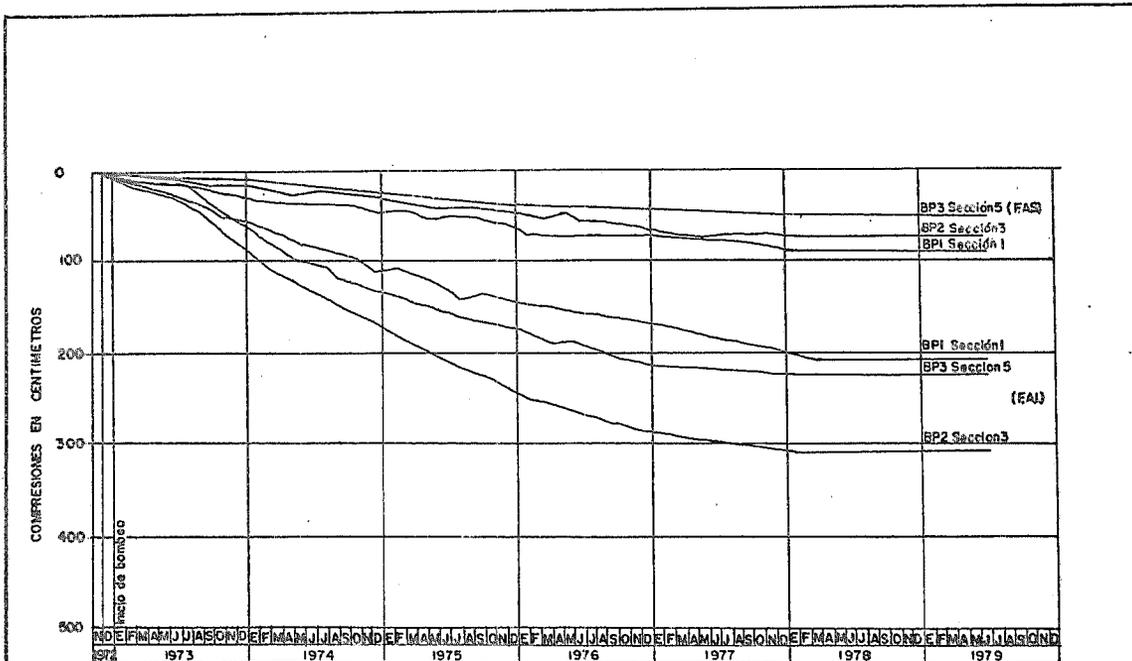
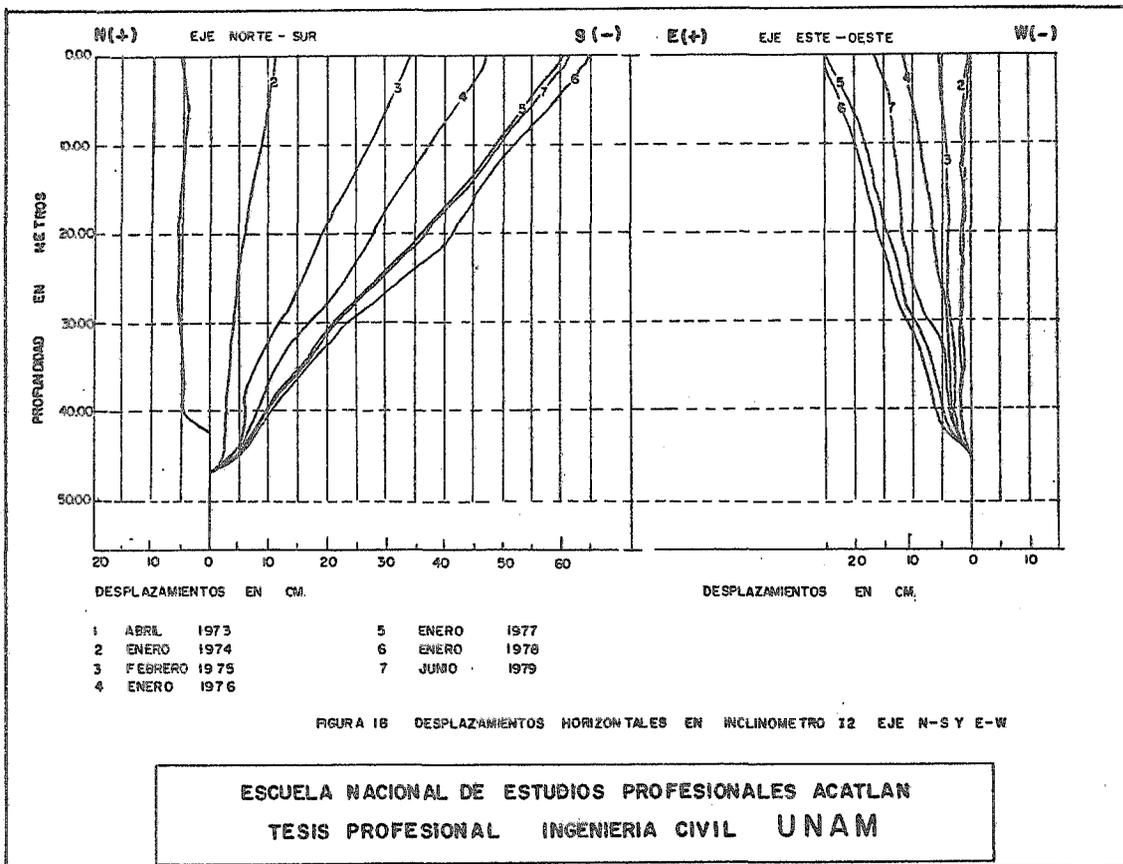
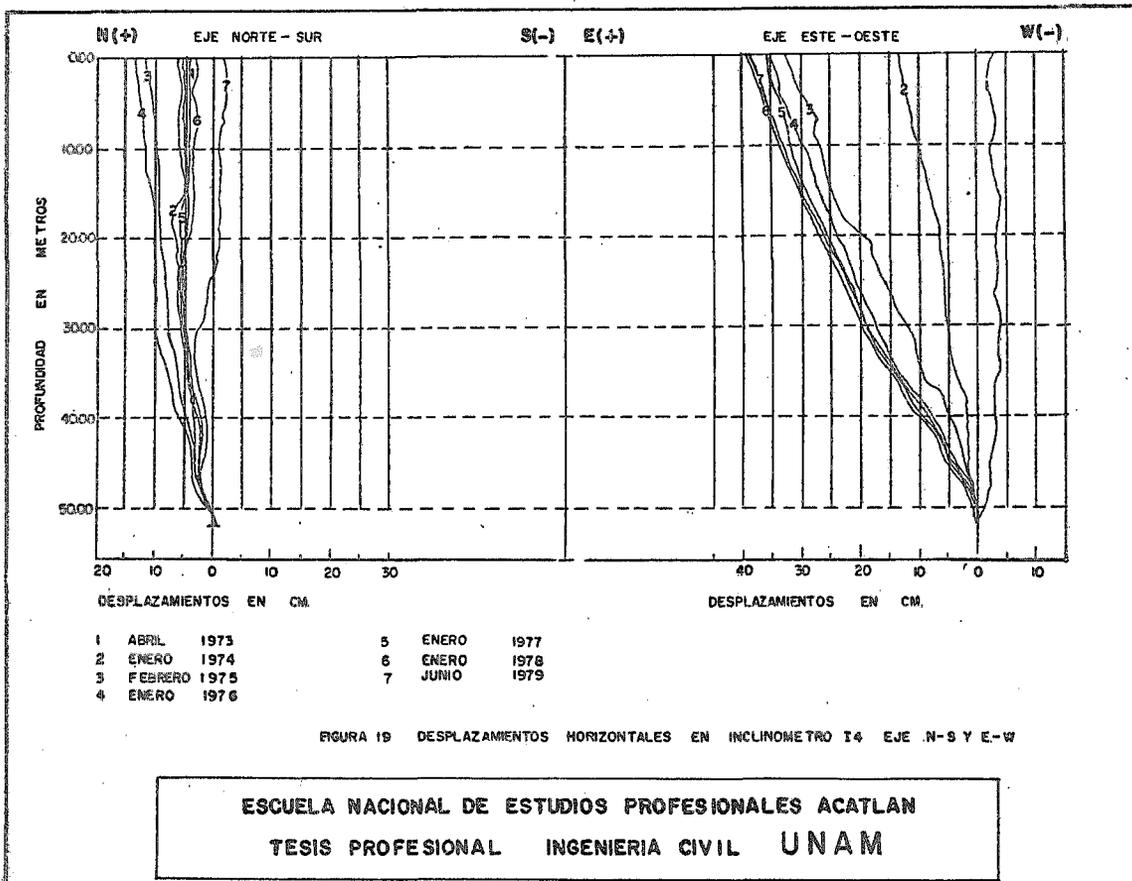


FIGURA 17 EVOLUCION DE LA COMPRESION EN LA FAS Y FAI

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM





CAPITULO V

ANALISIS DE LA INFORMACION OBTENIDA Y SU APLICACION EN EL PROYECTO.

5.1.- Métodos Constructivos en la Creación de Vasos de Almacenamiento.

La conveniencia de crear vasos de almacenamiento y de regulación en el Valle de México para proteger a la Ciudad de inundaciones y mejorar la utilización de los recursos hídricos de la cuenca, hizo que Proyecto Texcoco incluyera en su programa de estudios la realización de tres pruebas para la formación de lagos en la zona de Texcoco. Los tres procedimientos ensayados fueron:

- a).- Excavaciones profundas con draga flotante.
- b).- Licuación de las arcillas con explosivos.
- c).- Bombeo de aguas del subsuelo en un campo de pozos someros.

a) Excavaciones Profundas con Dragas Flotantes.

Este método tuvo como objetivo estudiar los problemas de estabilidad de taludes en arcillas con cortes profundos. La prueba se realizó a escala natural en el Lago de Texcoco, la fig. 20 muestra la excavación principal del proyecto de sección prismática de 8 m. de profundidad con taludes de 2:1 y 119 m. de longitud, la misma figura muestra la instalación de 8 inclinómetros, 13 bancos superficiales y una estación piezométrica. El equipo que se utilizó para la ejecución de

los trabajos fué una Draga Ellicot de 9.75 m. de eslora, 3.40 m. de manga, 0.70 m. de calado y tubería de descarga para distribuir el material extraído, además la maquinaria, contaba con una escalera que permitía hacer cortes -- hasta 2.44 m. de profundidad, y una bomba centrífuga de 25 cm. que operaba con una carga -- máxima de 21 m. y un caudal de 165 lts/seg.

El procedimiento que se siguió en -- la prueba de dragado consistió en excavar con la draga hidráulica el material arcilloso y mezclarlo con el agua que se encontraba en la excavación, formando lodos que fueron bombeados -- por medio de la tubería a cuatro tanques de -- 100 x 300 m. limitados por bordos que funcionaron como tanques sedimentadores.

Los trabajos de excavación efectuados por la Draga se realizaron en dos períodos, en la primera etapa se llevó acabo la excavación principal del 22 de enero al 2 de abril -- de 1968, ocurriendo a finales del mes de febrero un agrietamiento a 3 m. de la corona del talud poniente y la subsecuente falla del mismo en una extensión de 10 m. lo que se atribuyó a probables grietas antiguas y a la acción del agua proveniente del canal de retorno, el agrietamiento se detuvo cambiando la localización del canal de retorno. Los trabajos de -- dragado se continuaron sin fallas hasta alcanzar una profundidad de 5 m. y el agua que se -- utilizó para bombear el material extraído durante el período del 22 de enero al 10 de febrero de 1968, provino de un pozo de agua cercano a la excavación y debido a fallas en el -- pozo se continuó el bombeo hasta el 26 de junio con aguas negras procedentes del Río Churubusco.

La estación piezométrica EP que -- constó de tres instrumentos instalados a 6.3,-

17.5 y 34.2 m. de profundidad compararon la influencia de la excavación con un abatimiento de los niveles de agua de sólo 50 cm, aproximadamente y las mediciones de los desplazamientos horizontales en los inclinómetros I-7 y I-8 ubicados a 4 m. del borde superior del corte eran menores de 1 cm. días antes del deslizamiento.

El día 29 de marzo de 1968, se presentó un segundo movimiento en forma masiva afectando directamente al talud oriente, el fenómeno se desarrollo en término de horas y la falla abarcó 55 m. de longitud penetrando hasta el pie del talud.

Los inclinómetros I-7 e I-8 fueron afectados directamente, según puede observarse en la fig. 21, las componentes del desplazamiento horizontal en el I-8 son importantes en dirección al corte, en cambio los del inclinómetro I-7 revelan movimientos de igual magnitud en las direcciones E-O y N-S. En el inclinómetro I-7 la falla quedó localizada a 7 m. bajo la superficie original del terreno mientras que en el I-8 se presentó a 5.50 m además se observó que los desplazamientos horizontales en la dirección E-O registrados el 8 de abril en la parte superior de los inclinómetros I-7 e I-8 resultaron de 60 y 160 cm. respectivamente. Los movimientos posteriores que se presentaron después de la falla en el talud oriente y a 36 m. de distancia fueron pequeños, registrando los inclinómetros I-5 e I-6 desplazamientos entre 3 y 7 cm. y los aparatos I-1, I-2, I-3 e I-4 observaron movimientos menores de 5 cm.

La segunda etapa se realizó del 6 de mayo al 26 de junio de 1968 y consistió en prolongar el dragado del canal principal con -

el mismo ancho de 34 m., una longitud de 100 m m. y excavando a una profundidad de 2.80 m.

A fin de investigar la falla masiva del 29 de marzo de 1968 el Instituto de Ingeniería de la UNAM determinó con veleta las resistencias al corte "in situ" en los sondeos - ZD1, ZD2 y ZD3 mostrados en la fig. 22. Los - datos obtenidos en el sondeo ZD 1 se pudieron - considerar representativos de las condiciones - anteriores a la falla por encontrarse en una - zona poco afectada por el deslizamiento.

El análisis de la estabilidad del - talud oriente con base en las resistencias máximas determinadas en el sondeo ZD1 y la posición de la superficie de falla inferida de las mediciones en los inclinómetros, demuestra que el factor de seguridad para el talud 2: 1 y - profundidades de 5 m. es de 1.5, sin embargo - este factor de seguridad está lejos de la realidad, ya que los cálculos en el laboratorio - determinaron una estabilidad confiable para - este tipo de excavación con las dimensiones - - antes mencionadas y aún considerando las discrepancias que existieron entre las resistencias al corte de laboratorio y de la veleta, - no se justifica el deslizamiento observado en el talud oriente, esto induce a pensar que las arcillas del lago pueden estar fisuradas y que el proceso de falla es del tipo progresivo.

La Draga Ellicot usada en la prueba está diseñada para excavar a poca profundidad, por lo que los trabajos de la primera etapa - requirieron de tres cortes sucesivos que se - lograron abatiendo el nivel del agua dentro - del canal en construcción.

Analizando los costos del dragado,-

estos aumentan con el incremento de presión en la tubería de descarga, con la longitud de la tubería en tierra y con las maniobras necesarias para la disposición de lodos.

Los costos obtenidos fueron:

Primera Etapa:	Profundidad de Corte.	Costo directo
	0. - 2.80	\$ 3.41/m ³
	2.80 - 4.80	4.11/m ³
	4.80 - 6.00	4.37/m ³

En la segunda etapa con profundidad uniforme de 2.80 m., el costo directo fué de \$ 4.06/m³ excavado. Las condiciones especiales que requirió ésta prueba para el depósito de lodos fué que el producto del dragado quedara en capas de 10 cm., originando con esto mayores movimiento de tubería en tierra.

b) Licuación de las Arcillas con Explosivos.

Una de las técnicas recomendadas para la formación del Lago "Dr. Nabor Carrillo Flores" consistió en provocar la licuación de las arcillas mediante el uso de explosivos y bombear la suspensión producida a zonas de almacenamiento ubicada al Sur del área en estudio.

Los trabajos de investigación se realizaron en dos etapas, la primera consistió en ensayos de campo para determinar la forma económica de perforar entre 10 y 20 m. de profundidad escoger el explosivo y su colocación

más adecuada dentro de la masa arcillosa. La segunda fueron los estudios sobre variación de la resistencia al corte de las arcillas producidas por las explosiones.

Para la perforación de barrenos se usaron dos procedimientos, el primero consistió en el hincado dinámico de un tubo de 7.5 cm. de diámetro hasta una profundidad de 10 m. sellado en la parte inferior con un tapón de madera. Este método resultó lento y costoso debido a la presencia de una capa dura de 1 m. de espesor a 6 m. de profundidad. La segunda perforación se realizó con aguas a presión usando como guía un anillo de acero hasta 15 m. de profundidad, el procedimiento resultó rápido y de bajo costo.

Se iniciaron los ensayos preliminares con dinamita al 60% en dos barrenos de 10 m. de profundidad y de 7.5 cm. de diámetro, se cargó uno con 15 kgs. y el otro con 25 kgs. los efectos de la explosión fueron despreciables. La segunda tentativa se efectuó con Mex-Amón (Nitrato de Amonio) en 7 perforaciones de 12 m. de profundidad, localizada en los vértices de un exágono de 6 m. de lado y en el centro del mismo, se colocaron 210 kgs. de nitrato de amonio y 30 kg. de dinamita en los barrenos a profundidades de 6 y 12 m. y se fijó un retraso de 20 centésimos de segundo entre barrenos alternados. Por la falta de sensibilidad de la veleta los resultados de resistencia al corte antes y después de la explosión fueron imprecisos.

El tercer ensayo, se efectuó entre barrenos alineados a cada 100 m. y 13 m. de profundidad. El primero de ellos se cargó con 20 kg. de Toval (dinamita gelatinosa de

1.60 grs/ cm³ de densidad y velocidad de flagración de 4 000 m/seg.) el segundo con 30 kg. y el tercero con 50 kgs., se usaron veletas con diferentes dimensiones para registrar la variación de resistencia al corte.

La cuarta prueba se ejecutó haciendo 16 perforaciones de 15 m. de profundidad dispuestas según una cuadrícula de 10 m. de lado, en la que se usó Toval, con carga en cada barreno de 25 kgs, y que fueron confinadas con arena hasta la superficie. Para el detonado se usó estopines eléctricos y "primacord", empleándose una carga total de 400 kgs. para un volumen de suelo de 13,500 m³. Las detonaciones acusaron retardos, no obstante que se había dispuesto una explosión simultánea. En este ensayo se empleó una veleta diseñada por el Instituto de Ingeniería, con la cual se realizaron mediciones de la resistencia al corte antes de la explosión en los sondeos V1 y V2 indicados en la fig. 23, los resultados obtenidos con la veleta aparecen en la fig. 24, donde la resistencia máxima es del orden de 0.20 kg/ cm². en la capa ubicada a 3 m. bajo la superficie y crece a razón de 0.12 kg/cm², entre 8 y 20 m. de profundidad. La resistencia residual se midió después de imponer un intenso remoldeo al material mediante un giro de la veleta de 200 grados, aproximadamente, en la misma figura, se observa que la resistencia residual es de 0.07 Kg/cm² hasta 8 m. de profundidad incrementándose en niveles inferiores hasta 0.15 kg/cm².

La resistencia máxima como la residual fueron determinadas con una velocidad de rotación de 4 grados por minuto. Al comparar los resultados obtenidos en el campo con la veleta, con los de laboratorio tanto en pruebas triaxiales rápidas como de compresión sim-

ple, se observó que variaron considerablemente debido a:

- 1.- Los ensayos de laboratorio se realizaron con muestras mu alteradas.
- 2.- Las arcillas pueden encontrarse fisuradas en su estado natural.
- 3.- Existe la posibilidad de que el material al ensayarlo con la veleta se consolide parcialmente.
- 4.- El criterio que se aplicó para interpretar la falla en el caso de la veleta puede ser distinto del usado por los ensayos de comprensión simple y triaxial rápida.

Al día siguiente de detonarse la carga de Toval en los 16 barrenos, se realizaron pruebas con veletas en los puntos V_1' y V_2' fig. 23, los estudios registraron entre 10 y 20 m. de profundidad una disminución de resistencia al corte de 27 % en los puntos V_2' y V_2'' y de 40 % en el punto V_1' .

Este último reflejó mayor efecto debido a que la detonación se localizó cerca del barreno 1.

De los estudios anteriores se concluyó que no obstante la reducción en la resistencia al corte de los mantos de arcilla por la acción de los explosivos, su alcance es limitado y por lo mismo es poco probable la li-

cuación de dichos materiales, aún cuando se aumente notablemente la energía liberada en la explosión.

c) Bombeo de Aguas del Subsuelo en un Campo de Pozos Someros.

El sitio escogido para la realización de la prueba de bombeo está localizado a 5 km. del bordo poniente y a 650 m. al sur del Camino Peñón - Texcoco fig. 25.

Con objeto de verificar la estratigrafía en el área de bombeo se efectuó una exploración de penetración estándar, obteniéndose especímenes alterados de los diferentes estratos hasta una profundidad de 60 m., se le determinaron contenidos de agua en forma sistémica y límites de Atterberg, los resultados junto con el corte estratigráfico aparecen en la fig. 26, en los tramos del perfil que carecen de descripción no fué posible extraer muestras y casi sin excepción corresponden a capas de arenas; las más notables fueron localizadas a 6, 22, 35 y 52 m. de profundidad, con base en los contenidos de agua, se observó que la formación compresible superior se extiende hasta 35 m. de profundidad, la capa dura está localizada entre 35 m. y 38 m. bajo la superficie y la formación compresible inferior, tiene un espesor aproximado de 17 m.

En base a cálculos preliminares se decidió perforar 16 pozos de 60 m. de profundidad según una retícula de 100 m. de lado y 9 hectáreas de superficie total. En los pozos se instalaron bombas sumergibles K.S.B. para un caudal de 10 lts/seg. y una altura manométrica de 54 m. accionadas por motores eléctricos de 12.5 Hp. mismas que se sustituyeron al-

mes de haberse instalado por bombas de turbina do de 6.5 lts/seg. y de una capacidad de 7.5 Hp. no obstante que la selección del tipo de bomba fué hecho tomando en cuenta la salinidad del agua y el posible arrastre de arena fina, la operación tropezó con interrupciones frecuentes debido a desgaste y al mal funcionamiento de ciertas partes del mecanismo.

c.1) Características Geohidrológicas del Lago de Prueba.

Posteriores al estudio de la estratigrafía fué necesario valorar la transmisibilidad (T) y el coeficiente de almacenamiento de las formaciones arcillosas del subsuelo.

Las pruebas de consolidación estándar efectuadas con los materiales de ambas formaciones proporcionaron los valores de los coeficientes de consolidación (Cv) y de los índices de compresibilidad (mv) respectivos, los valores representativos medios de los parámetros anteriores son los siguientes para cada una de las formaciones.

	$C_v = 9 \times 10^{-3}$	$m^2/\text{día}$
F.A.S.	$mv = 0.52$	$cm^2/kg.$
	$C_v = 9.10^{-4}$	$m^2/\text{día}$
F.A.I.	$mv = 0.16$	$cm^2/kg.$

Con los valores de Cv y mv se pudo calcular el coeficiente de permeabilidad (K)-

para las formaciones arcillosas, en la tabla 7 se presentan los valores numéricos de las características geohidrológicas de las diversas formaciones del subsuelo de acuerdo con las pruebas de campo y laboratorio.

c.2) Instrumentación del Lago de Prueba.

A fin de observar la evolución del hundimiento inducido por el bombeo se instalaron previamente a la realización de las pruebas bancos de referencia, piezómetros e inclinómetros. La localización de éstos dispositivos aparecen indicadas en la fig. 27.

En base a la superficie estudiada se instalaron 49 bancos de referencia desplazados a 30 cm. de profundidad que permitieron medir tanto los asentamientos de la superficie como los desplazamientos horizontales respectivos por colimación, además para registrar los hundimientos fuera del área de bombeo se instalaron estacas en una zona que tenía 60 ha. de superficie y las nivelaciones se refirieron al banco profundo BNP-1. Las estaciones piezométricas EP-1, EP-2 y EP-3, localizadas tal y como se indica en la fig. 27, estuvieron compuestas de 5 ó 6 piezómetros del tipo Casagrande con puntas medidoras dispuestas a diferentes profundidades, cuatro de ellos en correspondencia con los estratos permeables intercalados en las Formaciones Arcillosas. Mediante pruebas de permeabilidad se comprobó el funcionamiento de éstos aparatos antes de iniciar el bombeo.

A lo largo de la línea de estaciones piezométricas hacia el oeste, fig. 27, se instalaron tres inclinómetros del tipo Slope -

Indicator. Los tubos indicadores se llevaron hasta 70 m. de profundidad, en perforaciones de 15 cm. de diámetro sostenidas por lodo bentónico; la liga entre los tubos y el terreno se efectuó con relleno de arena fina.

De los resultados obtenidos en el campo piloto de 9 ha., se elaboró un modelo matemático para predecir la evolución de los hundimientos y definir la estrategia de bombeo en el lago "Dr. Nabor Carrillo Flores". El prototipo se comprobó en base a la evolución piezométrica y a los asentamientos registrados en el área de investigación. Posteriormente al modelo se le hicieron ajustes que se fundamentaron en las pruebas del nuevo lago.

5.2 Propiedades Geohidrológicas de los Materiales del Subsuelo del Lago "Dr. Nabor Carrillo Flores".

De los cuatro sondeos profundos SP-1, SP-2, SP-3 y SP-4 ubicados en las secciones 4, 1, 3 y 5, analizados en el Capítulo III se estableció la estratigrafía del lago "Dr. Nabor Carrillo Flores" y en base a las muestras obtenidas fué necesario valorar los coeficientes de:

Consolidación Cv

Compresibilidad mv

Permeabilidad k

Almacenamiento

Específico Ss

Trasmisibilidad T

Almacenamiento

Total S

Estos coeficientes están definidos de la siguiente manera:

Coeficiente de Consolidación C_v . - Es el cambio de volumen en porcentaje del volumen referido al material seco que ocurre cuando el contenido de humedad de la muestra se reduce de la humedad de campo (h_c) hasta el límite de contracción.

Coeficiente de Compresibilidad m_v . - Se define como la relación de esfuerzo de formación del suelo, sin tomar en cuenta el tiempo, y que geométricamente es igual a la pendiente de la curva relación de vacíos-presiones.

Coeficiente de Permeabilidad k . Es la facilidad con que un líquido puede circular en el interior de dicho suelo y está dada por una constante propia del suelo.

Coeficiente de Almacenamiento Específico S_s . Es la cantidad almacenada que se libera por unidad de volumen del acuífero, cuando el potencial hidráulico disminuye en una unidad.

Coeficiente de Trasmisibilidad T . - Es el tiempo que tarda en recorrer un líquido en una unidad de área al estrato confinante.

Coeficiente de Almacenamiento Total S . Es la disminución del potencial hidráulico (h) en un punto dado de un acuífero confinado-

y suele deberse a la extracción de agua mediante bombeo y la consiguiente disminución de la presión intersticial.

Sin embargo a falta de muestras -- inalteradas provenientes de la zona estudiada -- que permitieran determinar en el laboratorio -- los coeficientes de permeabilidad (k) y de compressibilidad volumétrica (mv) de las arcillas -- de las formaciones superior e inferior, se -- optó por considerar los valores que se obtuvieron en el lago de prueba excepto los valores -- de Transmisibilidad (T) y de Almacenamiento Total (S), tabla 7, ya que al diferir los espesores de las formaciones del subsuelo en el lago de prueba con los del lago "Dr. Nabor Carrillo Flores", se modifican también los valores de -- éstos parámetros.

5.3 Predicción de Gastos y Asentamientos en el lago "Dr. Nabor Carrillo Flores" en base al Modelo Matemático.

El método adoptado para la construcción del lago consiste en extraer agua de las formaciones arcillosas drenándolas a través de los estratos permeables: capa dura y depósitos profundos, en estas condiciones los asentamientos serán sensiblemente iguales al volumen de agua que se extraiga de las zonas arcillosas, a su vez el gasto aportado por las arcillas dependen de los abatimientos piezométricos en los estratos permeables.

5.3.1) Cálculos de Gastos.

El período previsto de bombeo fué -- de cinco años y se dividió en intervalos de -- seis meses cada uno; se supuso que cada extra-

to en cada pozo se bombea a gasto constante - durante cada uno de los intervalos, y al mismo tiempo se determinó la distribución de gastos - que producirá el máximo abatimiento en cada - pozo al final del período así como el radio - equivalente para el cálculo de asentamientos - en la vecindad de los pozos de 50 m.

Debido a las consideraciones anteriores se calcularon los gastos de operación - que se obtendrían en tres condiciones distintas:

Caso I. En este caso se consideró el gasto total como proveniente de la capa dura, se impuso la condición de que el abatimiento piezométrico no fuera mayor que el abatimiento máximo admisible de 30 m. para esta capa debido a que se localiza a esa profundidad y se comprobó que el gasto total de la capa dura no excediera el gasto de diseño de 6.5 lts/seg.

Caso II. Para este caso se consideró que la capa dura y los depósitos profundos contribuyen al gasto total, se supuso que el gasto aportado por la capa dura no excediera del 20% del gasto de diseño, es decir de 1.3 lts/seg. y que el de los depósitos profundos no exceda el 80 % del gasto de diseño ó sea 5.2 lts/seg. esta relación es semejante a la relación de sus trasmisibilidades, además se impuso la condición de que el abatimiento piezométrico en cada estrato no fuera mayor que el abatimiento máximo admisible, siendo de 30 m. para la capa dura y de 50 m. para los depósitos profundos.

Caso III. Para obtener un hundimiento mayor al que efectivamente se debía producir en el período de 5 años de bombeo, se

supuso que los gastos aportados por la capa dura son los que se predicen para el caso I, y que los depósitos profundos aportan los gastos predichos para éste estrato en el caso II, fué conveniente considerar éste caso, pues cuando todo el gasto se extrae de la capa dura éste cae rápidamente a valores bastante inferiores al gasto de diseño de las bombas, por lo que en las condiciones reales de operación se podrá obtener una aportación considerable de los depósitos profundos, en la fig. 28 se muestra la distribución de los pozos utilizada en el cálculo y en la fig. 29 se aprecia la variación con el tiempo del gasto calculado en dos pozos, el 6 de una esquina y otro el 87 del centro para el caso II, como se dijo, se supone el gasto constante en cada período de 6 meses. La variación del gasto proveniente de la capa dura en los mismos pozos para el caso I se presenta en la fig. 30.

5.3.2) Cálculo de Asentamientos

Caso I. Por bombeo de la Capa Dura Exclusivamente.

Las curvas de nivel de igual asentamiento a los 6, 30 y 60 meses se presentan en la fig. 31, 32, y 33, donde a los cinco años el asentamiento máximo fué de 10.78 m. y el mínimo de 6.23 m. en la fig. 34 se muestra la variación del hundimiento con el tiempo de dos pozos, el 6 y el 87, notándose que ésta variación es prácticamente lineal. En la fig. 35, se aprecia la variación con el tiempo del volumen de hundimiento producido por el bombeo de la capa dura, éste volumen corresponde únicamente al campo de pozos de bombeo producido en cinco años y fué de 33.6×10^6 m³.

Caso II. Por bombeo de la Capa Dura y del Depósito Profundo.

Las curvas de nivel de igual asentamiento a los 6, 36 y 60 meses se presentan en las figs. 36, 37 y 38, a los cinco años el hundimiento máximo fué de 9.03 m. y el mínimo de 3.54 m.

Se consideró que el bombeo en los depósitos profundos está limitado por la línea imaginaria A-A', fig. 28, y representa para 126 pozos, la extracción de agua de los depósitos profundos con un espesor de 8.50 m. mientras que para el resto de los pozos no se bombea por considerar en esa zona un espesor ilimitado, así mismo se observa que la falta de simetría en las curvas de nivel es debida a la presencia de la frontera supuesta que separa a la zona que se bombea de la que no contribuye a la extracción.

La variación del hundimiento con el tiempo en los pozos 6 y 87 se muestran en la fig. 39 y en la fig. 40 se presenta la variación con el tiempo del volumen de hundimiento producido en el área cubierta por el campo de pozos. El máximo volumen de almacenamiento producido en éste caso fué de $26.5 \times 10^6 \text{ m}^3$. menor que en el caso I, aún cuando se ha considerado un bombeo en ambos acuíferos, lo anterior se debe a que en el caso II, el gasto proveniente de la capa dura cuyo rendimiento es grande se reduce extrayendo parte del gasto del depósito profundo cuyo rendimiento es bajo.

Caso III. Por bombeo de la Capa Dura y de los Depósitos Profundos.

Las curvas de nivel de igual asen--

tamiento a los 6, 30 y 60 meses se presentan - en las figs. 41, 42 y 43, el hundimiento máximo a los cinco años fué de 12.28 m. y el mínimo de 6.23., nuevamente la falta de simetría - en las curvas de nivel resulta de la presencia de la frontera supuesta para la zona en que - se bombea el agua en el depósito profundo.

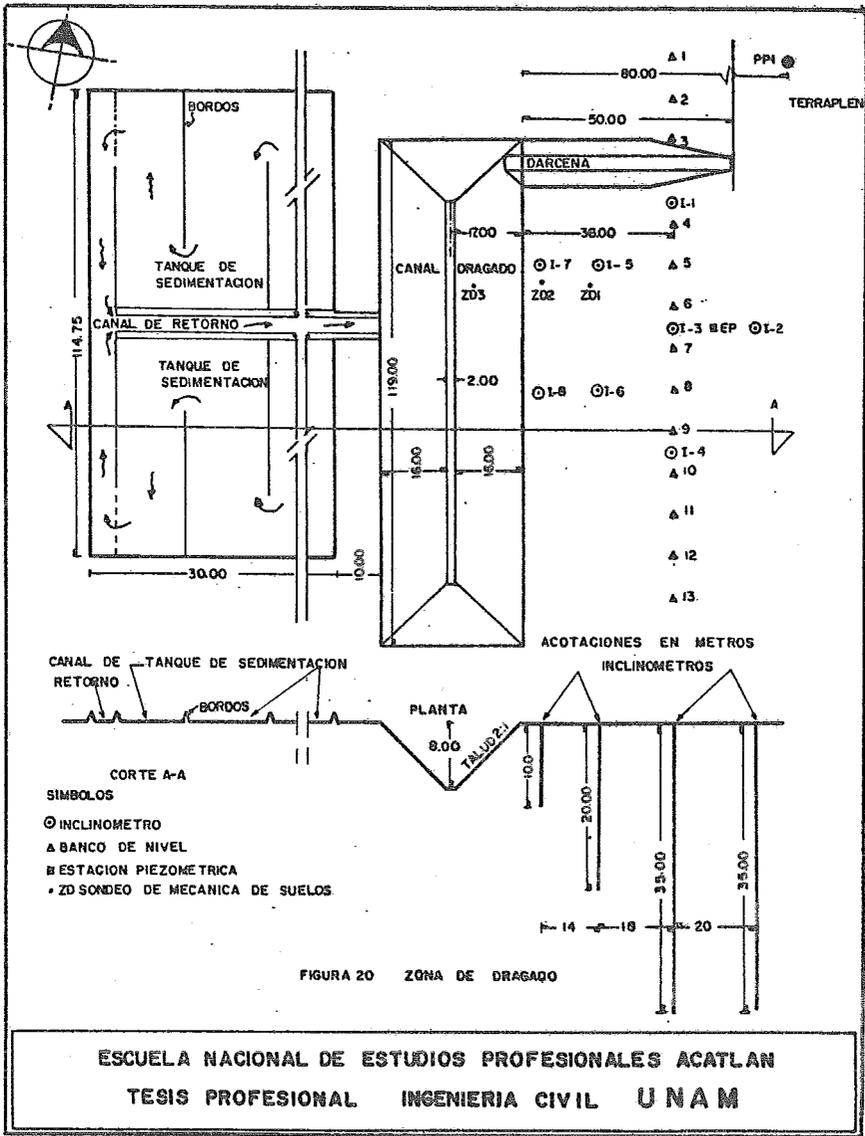
La variación del hundimiento con el tiempo en los pozos 6 y 87 se incluyen en la - fig. 44 y en la fig. 45 se muestra la varia- - ción con el tiempo del máximo volumen de asenta- miento producido que fué de $37.6 \times 10^6 \text{ m}^3$., - representando un mayor volumen que en los dos- - casos anteriores.

Debe mencionarse que la suma de -- gastos tanto en la capa dura como en los depó- - sitos profundos para el Caso III: es superior - a 6.5 lts/seg., en 30 pozos durante el primer- - período de bombeo y lo es en 6 pozos en el dέ- - cimo período.

5.4. Asentamientos fuera del Campo de Bombeo.

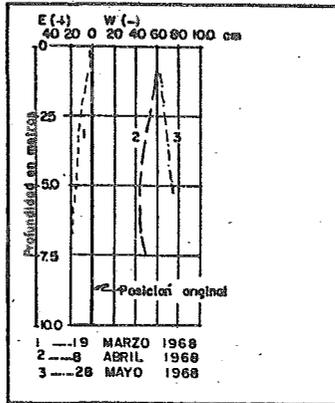
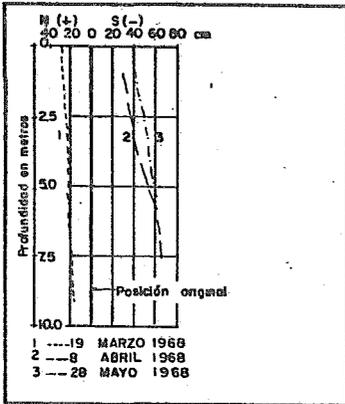
En la fig. 46 se presentan asenta- - mientos calculados fuera de la influencia del- - campo de pozos y debido al bombeo en la capa - dura exclusivamente, se nota que a 3 km. de - distancia o más los asentamientos fueron prac- - ticamente iguales a cero, si se toma en cuenta el efecto del depósito profundo, éste sería - mucho menor que al de la capa dura y los resul- - tados no cambiarían de manera apreciable.

Por lo tanto las futuras obras de - ampliación del Aeropuerto Internacional de la - Ciudad de México quedaron fuera de la zona de - influencia de los pozos de bombeo en lo rela- - cionado con los asentamientos del lago "Dr. - Nabor Carrillo Flores"



ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

INCLINOMETRO 7



INCLINOMETRO 8

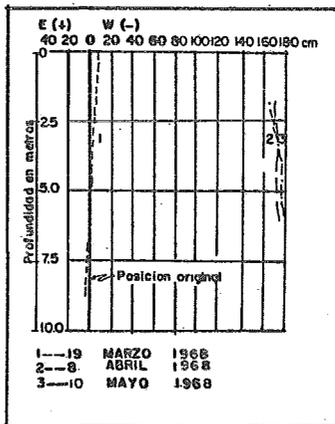
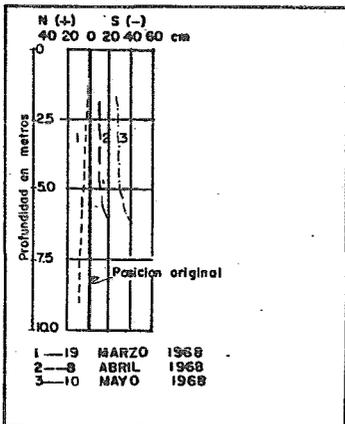


FIGURA 21 OBSERVACIONES EN LOS INCLINOMETROS 7, 8

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLÁN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

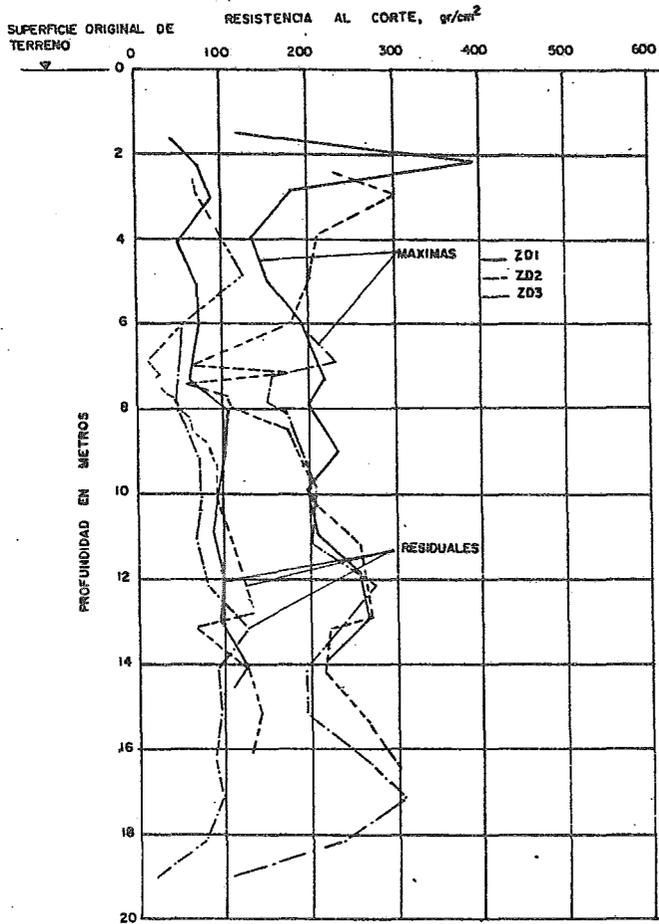
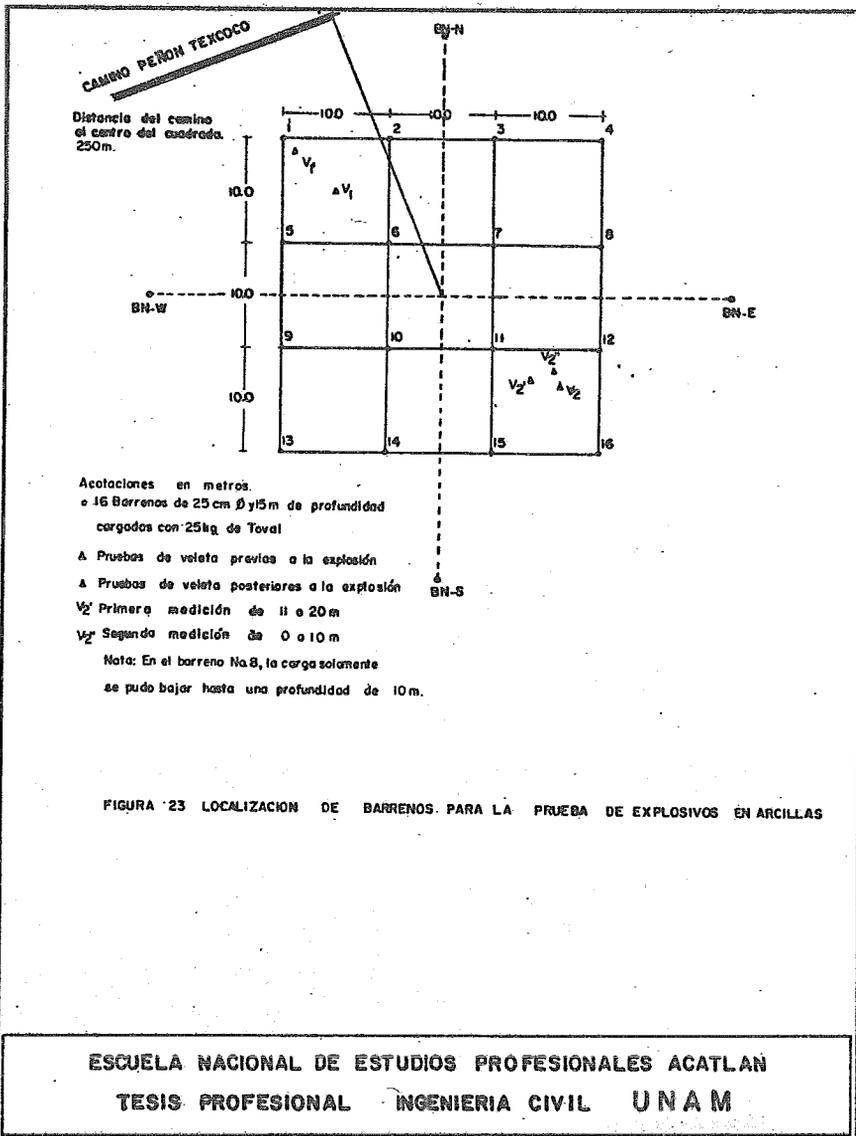


FIGURA 22 RESISTENCIA AL CORTE CON VELETA EN LOS ZONDEOS Z01, Z02, Y Z03

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM



ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

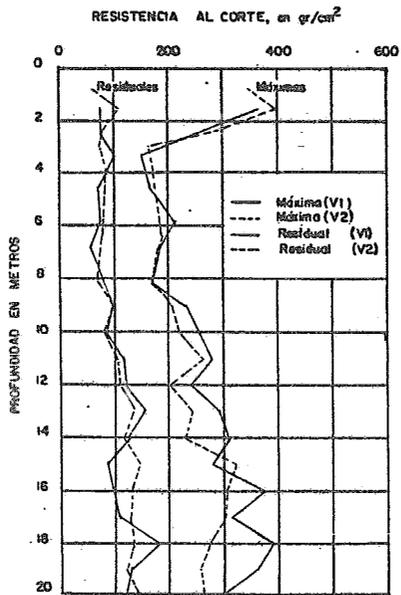


FIGURA 24 RESISTENCIAS AL CORTE MAXIMA Y RESIDUAL DETERMINADAS CON PRUEBAS DE VELETA ANTES DE LA EXPLOSION EN LOS PUNTOS V1 Y V2.

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

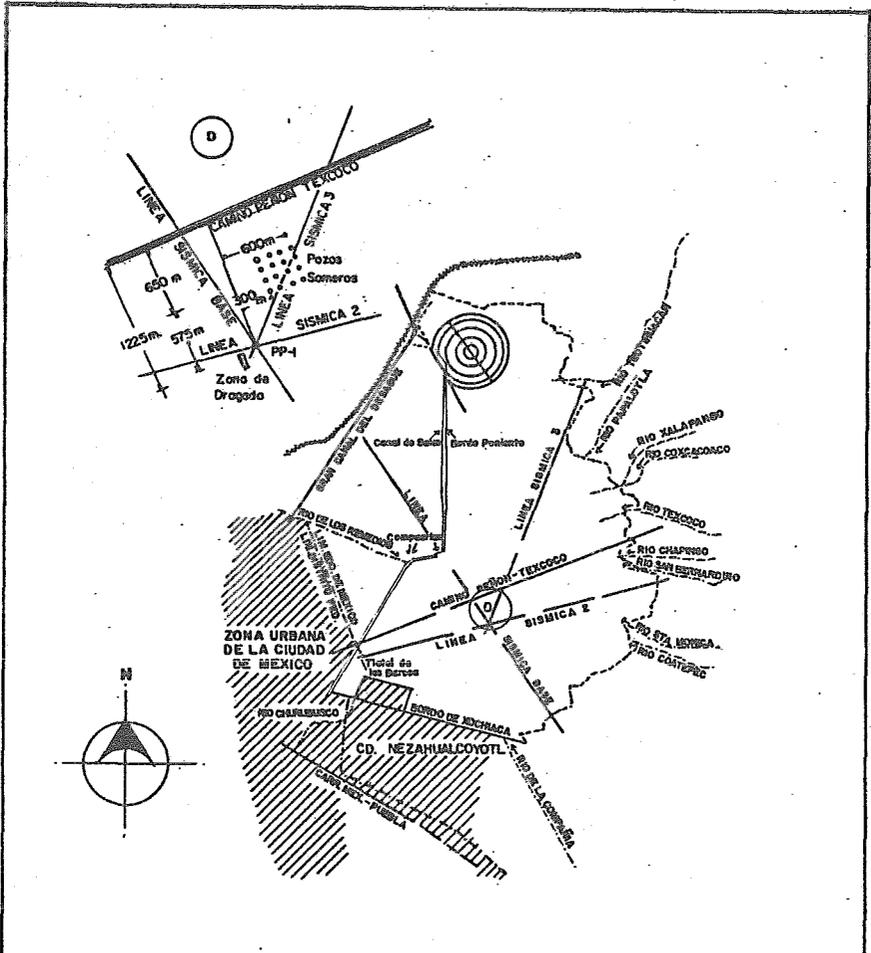
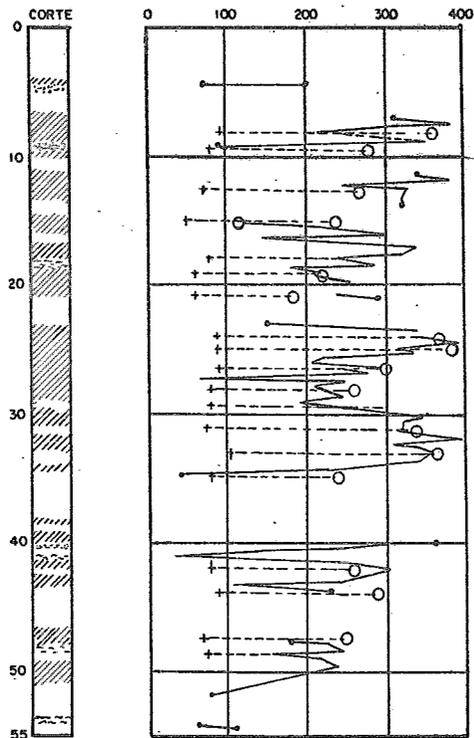


FIGURA 25 LOCALIZACION DE LA PRUEBA DE BOMBEO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM



SIMBOLOS



ARCILLA



VIDRIO VOLCÁNICO

• Wt CONTENIDO DE AGUA (%)

+ Wl LIMITE LIQUIDO (%)

○ Wp LIMITE PLASTICO (%)



LIMO



ARENA



SIN RECUPERACION

FIGURA 26 SONDEO DE PENETRACION ESTANDAR EN LA ZONA DE POZOS SOMEROS

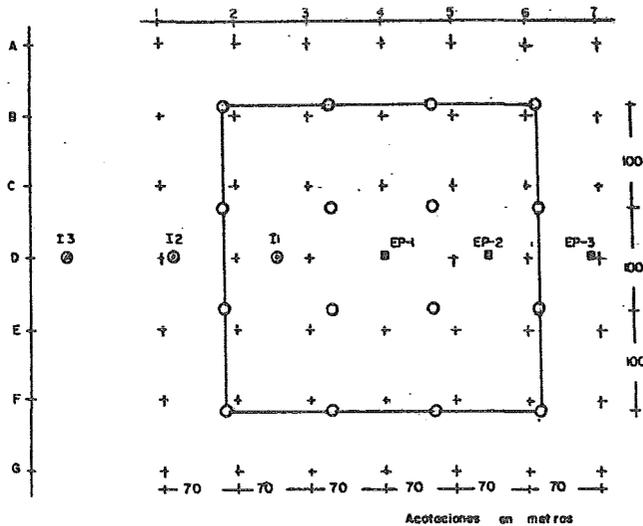
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

TABLA 7

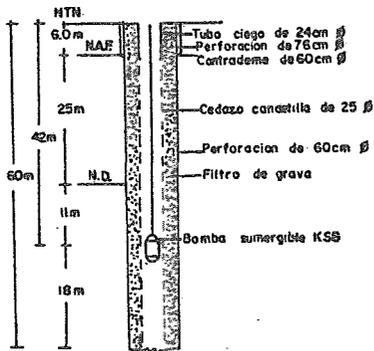
CARACTERISTICAS GEOHIDROLÓGICAS DE LAS FORMACIONES DEL SUBSUELO DEL LAGO DE PRUEBA

FORMACION	ESPESOR b , en metros	COEF. DE PERMEABILIDAD K , en m/día	COEF. DE TRANSMISIBILIDAD T , en $m^2/día$	COEF. DE ALMACENAMIENTO, S	COEFICIENTE C_V $C_V = T/S$ en $m^2/día$	COEF. DE ALMACENAMIENTO, ESPECÍFICO S_S , en m^{-1}
ARCILLOSA SUPERIOR	$b = 35$ $b = 32$	$K = 0.47 \times 10^{-3}$	$T = 1.64 \times 10^{-2}$ $T = 1.5 \times 10^{-2}$	$S = 1.82$ $S = 1.66$	$C_V = 9 \times 10^{-3}$	$S_S = 5.2 \times 10^{-2}$
PERMEABLE SUPERIOR (CAPA DURA)	$b_1 = 3$	$K_1 = 8$	$T_1 = 18$	$S_1 = 1.65 \times 10^{-4}$	$C_{V1} = 1.08 \times 10^{+3}$	$S_{S1} = 5.5 \times 10^{-5}$
	$b = 2$	$K_1 = 8$	$T_1 = 16$	$S_1 = 1.77 \times 10^{-4}$	$C_{V1} = 9.05 \times 10^{+4}$	$S_{S1} = 8.83 \times 10^{-5}$
ARCILLOSA INFERIOR	$b = 15$ $b = 16.5$	$K = 1.44 \times 10^{-5}$	$T = 2.16 \times 10^{-4}$ $T = 2.38 \times 10$	$S = 0.24$ $S = 0.26$	$C_V = 9 \times 10^{-4}$	$S_S = 1.6 \times 10^{-2}$
PERMEABLE INFERIOR	$b_2 = 7$	$K_2 = 7.8$	$T_2 = 42$	$S_2 = 3.85 \times 10^{-4}$	$C_{V2} = 1.08 \times 10^{+5}$	$S_{S2} = 5.5 \times 10^{-5}$
	$b = 8.5$	$K = 7.5$	$T = 63$	$S = 7.3 \times 10^{-4}$	$C_V = 8.47 \times 10^{+4}$	$S_S = 0.9 \times 10^{-4}$

* VALORES CORRESPONDIENTES AL LAGO DR. NABOR CARRILLO FLORES



ESQUEMA DE POZO



SÍMBOLOS

- POZO SOMERO
- ⊙ INCLINOMETRO
- ⊠ ESTACION PIEZOMETRICA
- + BANCOS DE NIVEL SUPERFICIAL
- N.D. NIVEL DINAMICO

FIGURA 27 LOCALIZACION DE INSTRUMENTACION EN EL CAMPO DE POZOS SOMEROS

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

	SECCION 1				SECCION 2				SECCION 3				SECCION 4				SECCION 5			
6	18	30	42	54	66	78	90	102	114	126	138	150	162	174	186	198	210	222	234	246
5	7	19	31	43	55	67	79	91	103	115	127	139	151	163	175	187	199	211	223	235
4	8	20	32	44	56	68	80	92	104	116	128	140	152	164	176	188	200	212	224	236
3	9	21	33	45	57	69	81	93	105	117	129	141	153	165	177	189	201	213	225	237
2	10	22	34	46	58	70	82	94	106	118	130	142	154	166	178	190	202	214	226	238
1	11	23	35	47	59	71	83	95	107	119	131	143	155	167	179	191	203	215	227	239
	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132	144	156	168	180	192	204	216	228	240

FIGURA 28 LOCALIZACION DE POZOS

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

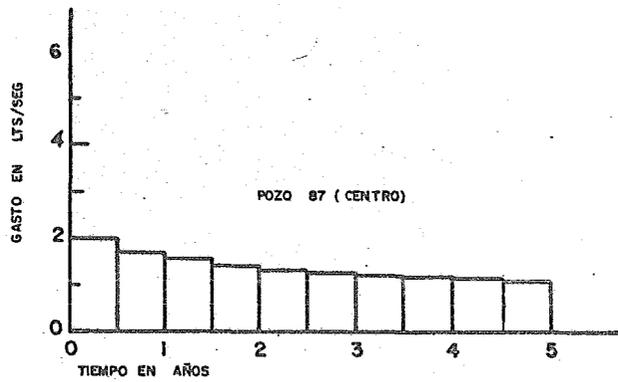
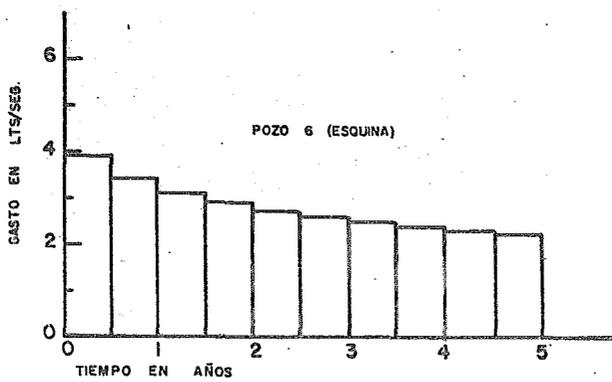
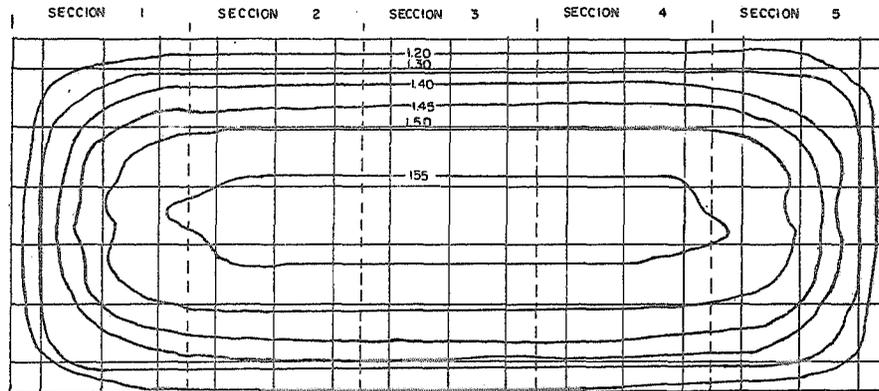


FIGURA 30 GASTO PROVENIENTE DE LA CAPA DURA CASO I



TIEMPO DE BOMBEO 6 MESES

Unidades en metros

FIGURA 31 ASENTAMIENTOS PROVOCADOS POR EL BOMBEO DE LA CAPA DURA. CASO I

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

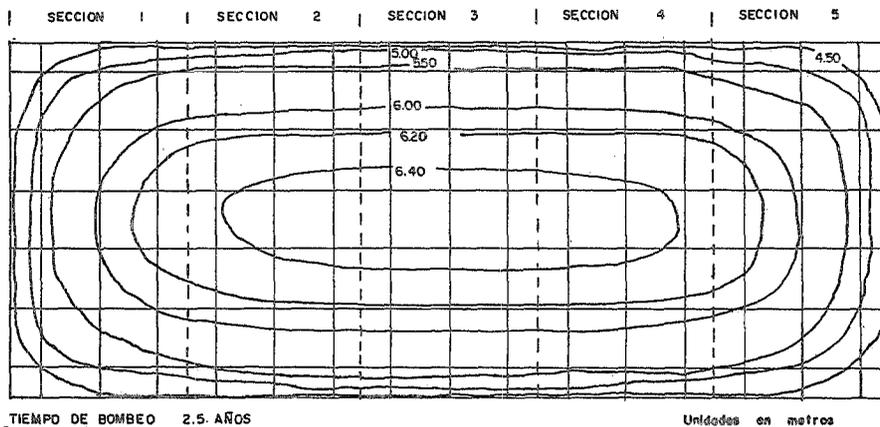


FIGURA 32 ASENTAMIENTOS PROVOCADOS POR EL BOMBEO DE LA CAPA DURA. CASO I

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

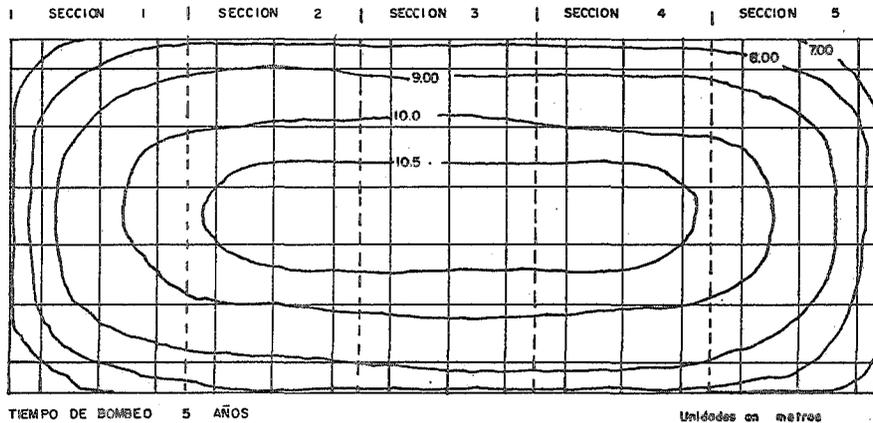


FIGURA 33 ASENTAMIENTOS PROVOCADOS POR EL BOMBEO DE LA CAPA DURA. CASO I

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

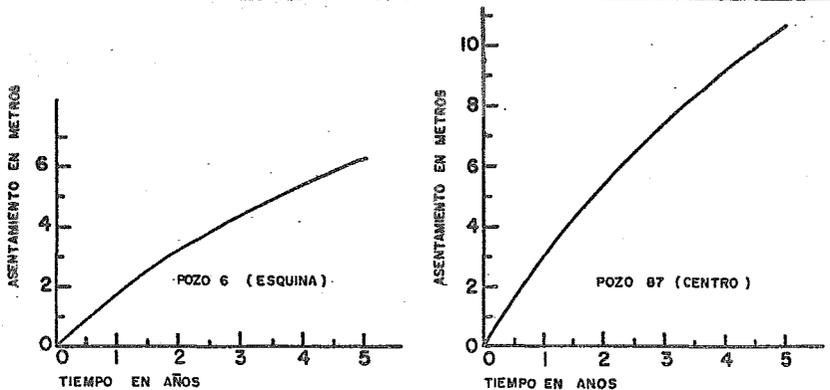


FIGURA 34 ASENTAMIENTOS DEBIDO AL BOMBEO DE LA CAPA DURA, CASO I

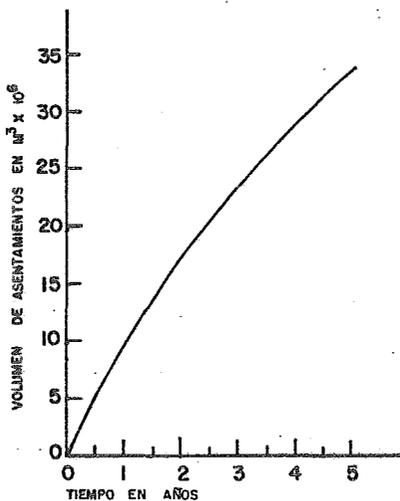


FIGURA 35 VOLUMEN DE ASENTAMIENTOS DEBIDO AL BOMBEO DE LA CAPA DURA, CASO I

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

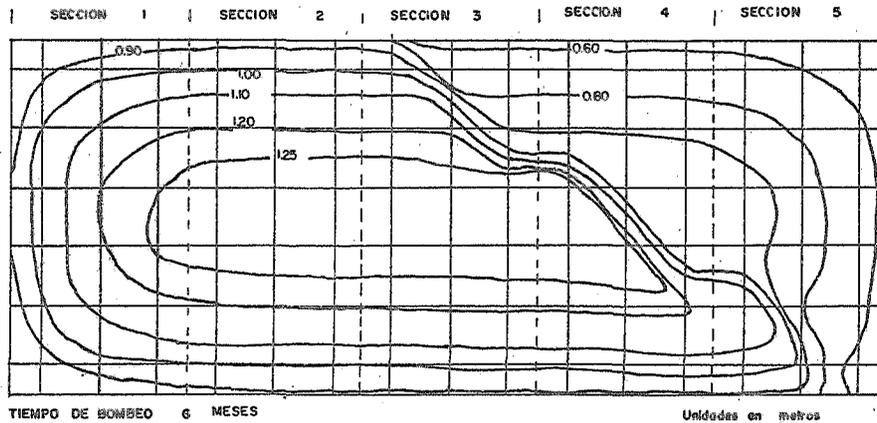
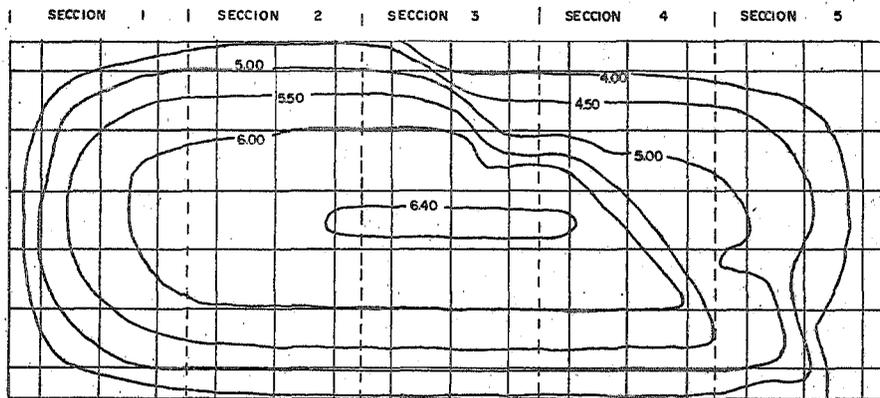


FIGURA 35 ASENTAMIENTOS PROVOCADOS POR EL BOMBEO DE LA CAPA DURA Y EL DEPOSITO PROFUNDO. CASO II

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM



TIEMPO DE BOMBEO 3 AÑOS

Unidades en metros

FIGURA 37 ASENTAMIENTOS PROVOCADOS POR EL BOMBEO DE LA CAPA DURA Y EL DEPOSITO PROFUNDO. CASO I I

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

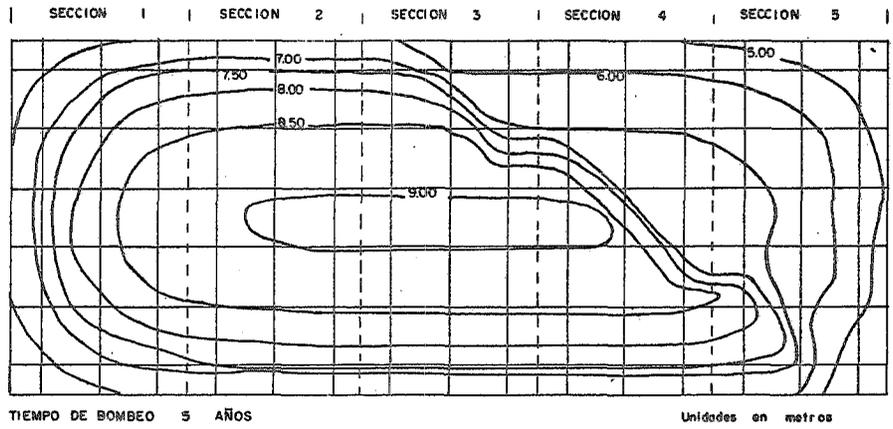


FIGURA 38 ASENTAMIENTOS PROVOCADOS POR EL BOMBEO DE LA CAPA DURA Y EL DEPOSITO PROFUNDO. CASO II

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLÁN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

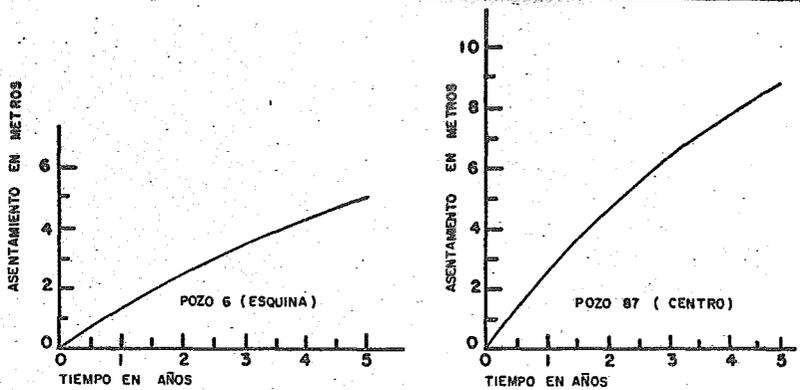


FIGURA 39 ASENTAMIENTOS DEBIDO AL BOMBEO EN LOS DOS ACUIFEROS. CASO II

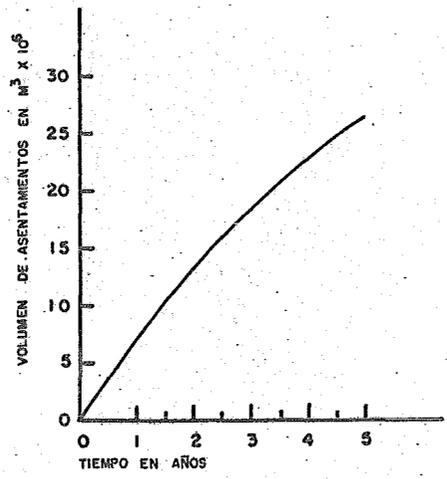


FIGURA 40 VOLUMEN DE ASENTAMIENTOS DEBIDO AL BOMBEO DE LA CAPA DURA Y EL DEPOSITO PROFUNDO. CASO II

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

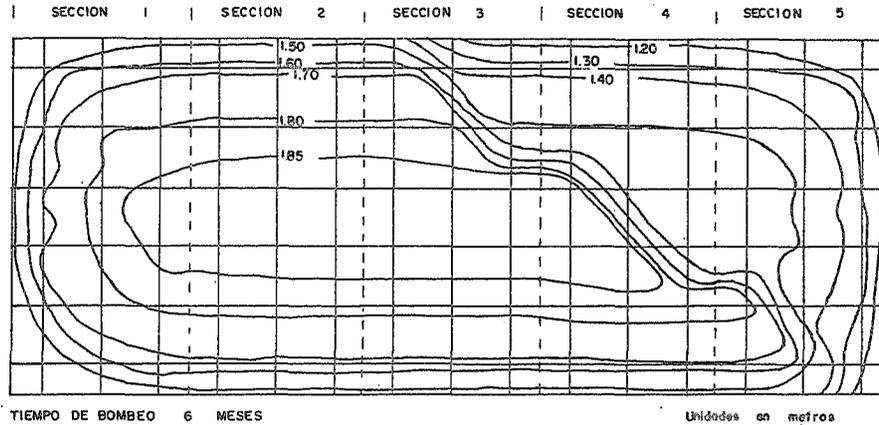


FIGURA 41 ASENTAMIENTOS PROVOCADOS POR EL BOMBEO DE LA CAPA DURA Y EL DEPOSITO PROFUNDO. CASO III

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

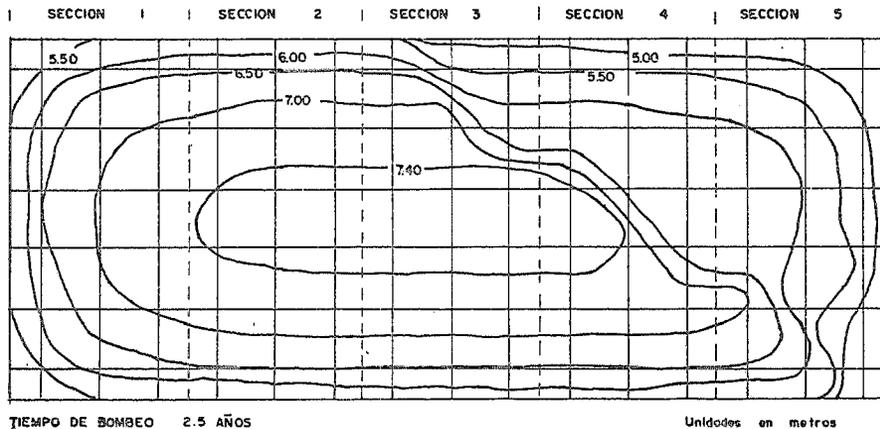


FIGURA 42 ASENTAMIENTOS PROVOCADOS POR EL BOMBEO DE LA CAPA DURA Y EL DEPOSITO PROFUNDO. CASO III

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

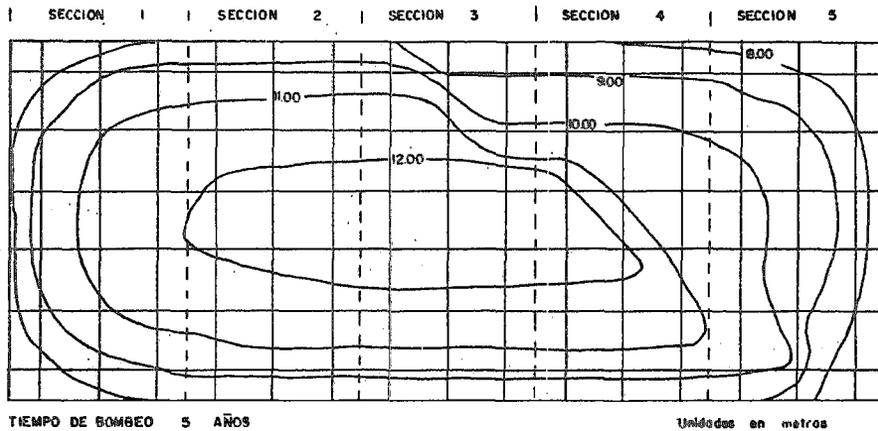


FIGURA 43 ASENTAMIENTOS PROVOCADOS POR EL BOMBEO DE LA CAPA DURA Y EL DEPOSITO PROFUNDO. CASO III

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

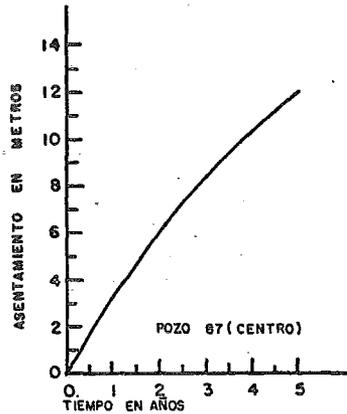
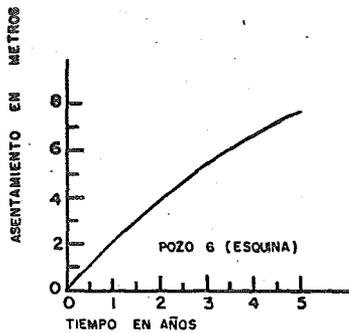


FIGURA 44 ASENTAMIENTOS DEBIDO AL BOMBEO DE LA CAPA DURA Y EL DEPOSITO PROFUNDO. CASO III

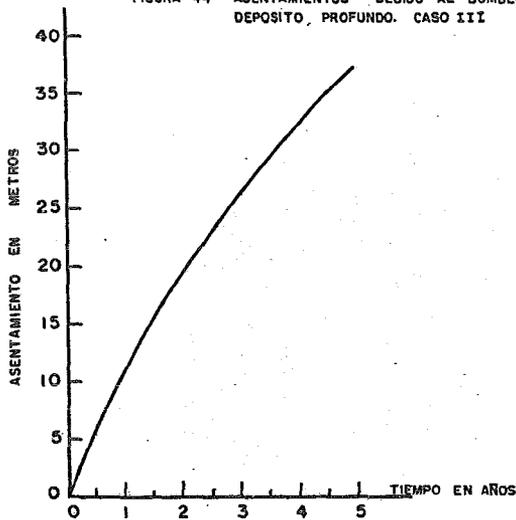


FIGURA 45 VOLUMEN DE ASENTAMIENTOS DEBIDO AL BOMBEO DE LA CAPA DURA Y EL DEPOSITO PROFUNDO. CASO III

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

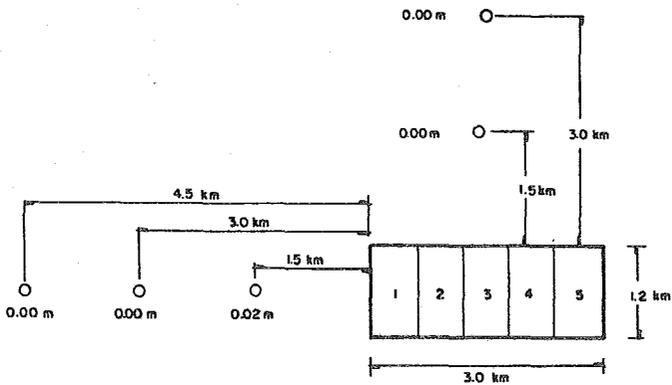


FIGURA 46 ASENTAMIENTOS A GRANDES DISTANCIAS DEBIDOS
AL BOMBEO DE LA CAPA DURA. CASO I

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

CAPITULO VI

CORRELACION DE DATOS TEORICOS Y REALES.

La correlación de los resultados teóricos con los resultados reales se hizo en base a la segunda Hipótesis (caso II) presentada en el capítulo V por el Instituto de Ingeniería en el Modelo Matemático y a los resultados obtenidos por la instrumentación instalada en el lago "Dr. Nabor Carrillo Flores".

El intervalo de tiempo de bombeo que se tomó como comparación para el análisis teórico y real fué de cinco años, divididos en 10 períodos de seis meses cada uno, iniciándose en enero de 1973 y finalizando en diciembre de 1977. Es importante mencionar que en el lago "Dr. Nabor Carrillo Flores" el bombeo se suspendió en octubre de 1978 con una capacidad de almacenaje de $11 \times 10^6 \text{ m}^3$, nueve meses después de haberse previsto su terminación teórica.

Las condiciones de trabajo de las bombas que usó el Instituto de Ingeniería en el Lago de Prueba para la extracción del agua del subsuelo, fueron bombas del tipo K.S.B. con una potencia de 12.5 Hp. y tiempo de operación de 24 horas, éstas bombas sufrieron fallas a los 30 días de haberse instalado, optándose por instalar bombas de turbinado de 6.5 lts/seg. de capacidad y motores de 7.5 Hp, éstas mismas se utilizaron en el bombeo del lago "Dr. Nabor Carrillo Flores", además el tiempo de operación dependió del comportamiento de los pozos ya que los ademes disponían de un tapón en la parte inferior que se comportaban como pilotes apoyados en su punta en los depósitos profundos permeables, y la arcilla en proceso de consolidación al comprimirse,

transmitía al fuste de los ademes cargas descendentes que los había trabajar como columnas cargadas. Las variaciones que se tuvieron y que deformaron a los ademes provocaron un contacto con la columna de bombeo que a su vez produjeron un colapso en la operación de la bomba, este colapso se presentó infinidad de veces en la formación del lago debido a los asentamientos verticales y a los desplazamientos horizontales al irse consolidando el subsuelo. Otro factor que influyó en la operación de las bombas fueron las interrupciones de la energía eléctrica.

6.1.- Comparación de Gastos Teóricos y Reales.

En la fig. 47 se puede observar que el gasto bombeado teórico alcanza un valor aproximado de 66 millones de m^3 al cabo de 5-años de operación y el gasto bombeado real para el mismo tiempo fué de 57 millones de m^3 aproximadamente, bajo las condiciones antes mencionadas, se tiene que las dos curvas se mantienen lineales y tienden a ser constantes con el tiempo.

6.2.- Comparación de Hundimientos Teóricos y Reales.

a).- La configuración de hundimientos teóricos en la línea central H en dirección Este-Oeste, para los intervalos de tiempo 6, 36 y 60 meses se muestra en la fig. 48, se observa que en la dirección Oriente el hundimiento es mayor y constante que del lado Poniente, alcanzándose un hundimiento máximo de 9.03 m. respecto a la superficie del terreno.

La disposición teórica de los hundi

mientos en la línea central 14 con dirección Norte-Sur se presenta en la fig. 49 acusando en dirección Norte un hundimiento mayor y uniforme que la dirección Sur. Siendo de tal manera que las que más contribuyen son las secciones 2 y 3.

En cambio en la fig. 50 la configuración de hundimientos reales demuestra lo contrario para la línea H y para el mismo intervalo de tiempo muestra que se ha presentado una depresión hacia el Oeste, cuyo efecto en las secciones 3, 4 y parte de la 5 lo demuestran.

En la fig. 51 se muestra el comportamiento del hundimiento real del lago sobre la línea 14, y se observa que la evolución en la dirección Norte-Sur es similar a la presentada por el análisis teórico. Así el mayor hundimiento provocado en la zona del lago fue de 3.48 m.

De la comparación teórica y en base a la hipótesis presentada en el caso II del capítulo V inciso 5.5. como cálculo de asentamientos, no existe diferencia apreciable en cuanto al hundimiento producido en el lago, si se toma como 3.54 m el hundimiento mínimo teórico y 3.48 m. el real.

b.- Los hundimientos medios teóricos y reales para cada período analizado se muestran en la tabla 8 así como la velocidad de asentamientos.

Se observa que el comportamiento seguido por el hundimiento teórico en los tres primeros períodos es del orden de 0.93 m. con una velocidad de 1.89 m. anual y continúa en forma descendente hasta el décimo período re-

gistrando un hundimiento medio de 2.53 m. y una velocidad de 1.10 m. por años.

Comparando los resultados con los hundimientos medios y velocidad de asentamientos reales se advierte una gran divergencia de los valores obtenidos, siendo una de las causas las fallas provocadas por la energía eléctrica y el tipo de bomba instalada.

c).- La eficiencia o rendimiento del bombeo, para el estudio teórico decrece casi linealmente, mostrando en la tabla 9 este comportamiento, mientras que para el caso real resulta muy irregular con tendencia a través del tiempo a ser nulo.

6.3.- Comparación de Almacenaje Teórico y Real.

Una vez conocida la configuración de asentamiento tanto teórico como real, se pudo determinar la capacidad de almacenaje, mostrando en la fig. 52 el comportamiento de los volúmenes en donde la línea teórica de almacenaje con lo real presenta una diferencia muy definida.

6.4.- Comparación de Costos de Volumen Hundido Teórico y Real.

Por último compararemos el costo teórico con el real de cada m^3 hundido en el lago, en la fig. 53 se muestran graficados los volúmenes teóricos, extraído y hundido desde el inicio de la prueba hasta el término de ésta, notando que los volúmenes son casi lineales, en tanto que el costo unitario se grafica

desde el mes de enero de 1973, con un costo -- inicial aproximado de \$ 44.77/m³ descendiendo hasta ser prácticamente constante a 1977 con un costo de \$ 2.15/m³.

En la Fig. 54 se grafican los volúmenes extraídos y hundidos reales, que comparados con los resultados teóricos presentan un volumen menor. El costo unitario al inicio del bombeo en el mes de enero de 1973 fué de - - - \$ 181.92/m³, que comparado con el costo teórico representan un 406.34% más caro y para diciembre de 1977 el costo unitario real era de \$ 5.30/m³ que representa un 246.51% más caro que el teórico, es importante señalar que a -- partir de julio de 1977 la gráfica del costo unitario real cambió del orden descendente al ascendente y llegó a un costo de \$ 5.69/m³ al mes de octubre de 1978, la recuperación hace pensar que las formaciones arcillosas llegaron a su máxima consolidación.

La inversión para el mes de enero de 1973 fué de 30.9 millones de pesos y para octubre de 1978 de 64.3 millones de pesos, cabe señalar que el costo real puede disminuir ya que no se consideró el valor de rescate de todas las bombas e instalaciones eléctricas -- dentro del Lago "Dr. Nabor Carrillo Flores".

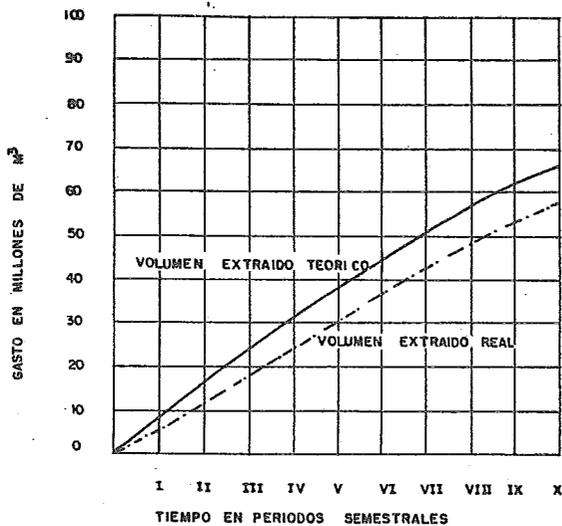


FIGURA 47 COMPARACION DE VOLUMENES EXTRAIDOS TEORICO Y REAL

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

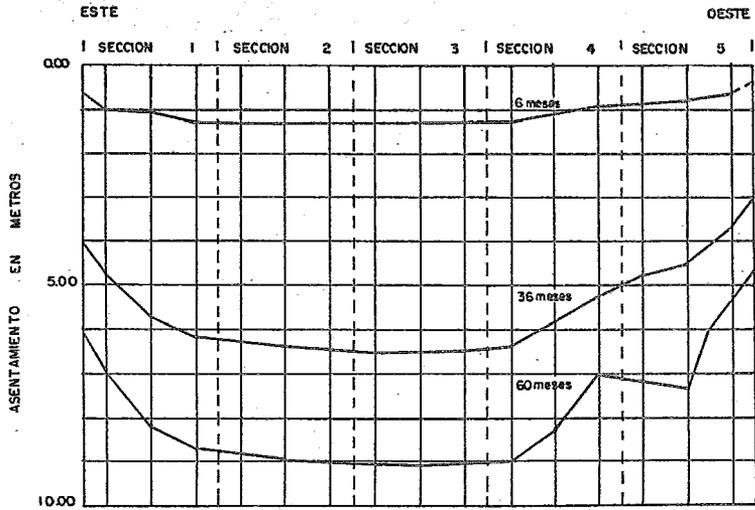


FIGURA 48 PERFILES DE ASENTAMIENTOS TEORICOS EN LA LINEA CENTRAL H
CASO II

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

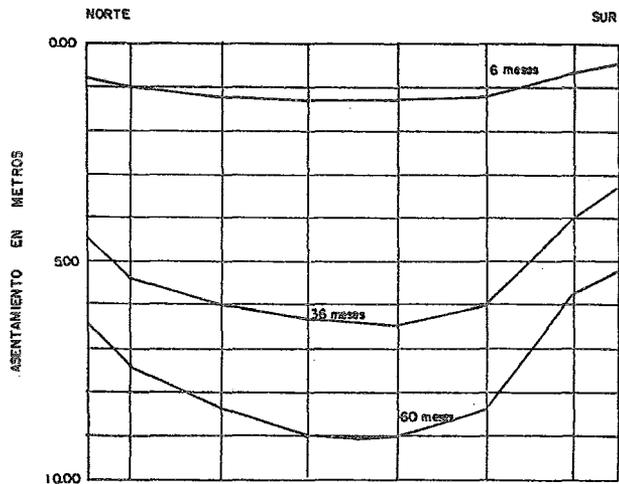


FIGURA 49 PERFILES DE ASENTAMIENTOS TEORICOS EN LA LINEA CENTRAL 14 CASO II

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

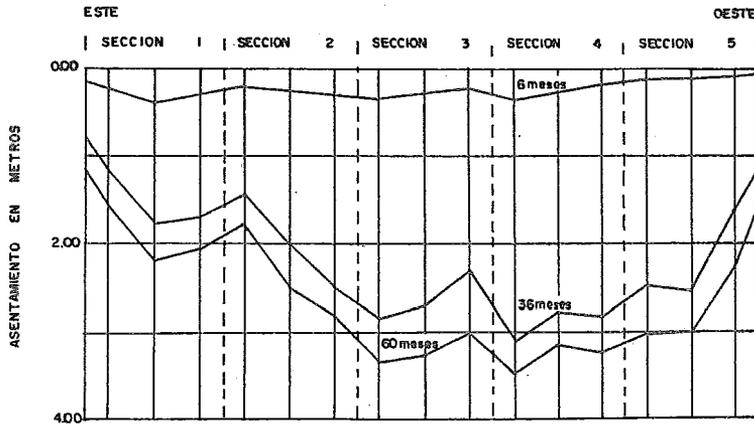


FIGURA 50 PERFILES DE ASENTAMIENTOS REALES EN LA LINEA CENTRAL H

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

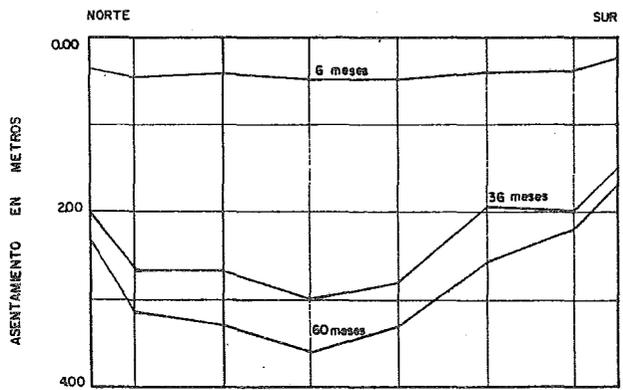


FIGURA 51 PERFILES DE ASENTAMIENTOS REALES EN LA LINEA CENTRAL 14

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

TABLA 8

HUNDIMIENTOS MEDIOS TEORICOS Y REALES

123

 Hundimientos Medios Teóricos

Hundimiento Medio (m)	Período	Vel. de Hundimiento Anual (m)
0.98	I	
0.91	II	1.89
0.92	III	
0.78	IV	1.70
0.76	V	
0.64	VI	1.40
0.63	VII	
0.58	VIII	1.21
0.57	IX	
0.53	X	1.10

El área del lago es de $1.2 \times 3.0 \text{ km} = 3.6 \times 10^6 \text{ m}^2$

 Hundimientos Medios Reales

Hundimiento Medio (m)	Período	Vel. de Hundimiento Anual (m)
0.26	I	
0.73	II	0.99
0.31	III	
0.27	IV	0.58
0.18	V	
0.23	VI	0.41
0.14	VII	
0.18	VIII	0.32
0.07	IX	
0.01	X	0.08

El área del lago es de $1.4 \times 3.2 \text{ km} = 4.48 \times 10^6 \text{ m}^2$

TABLA 9

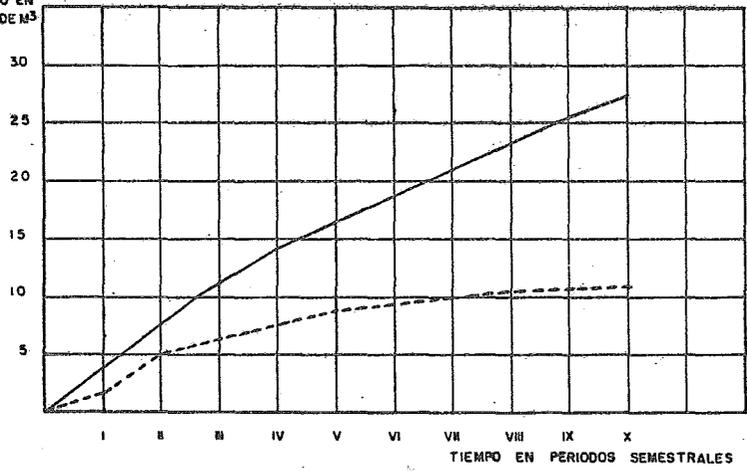
124

RENDIMIENTOS TEORICOS Y REALES

Rendimientos Teóricos		
Volumen Hundido	Volumen Extraído	Rendimiento %
3.54×10^6	8.13×10^6	43.54
3.31	7.53	43.95
3.34	7.29	45.82
2.81	7.01	40.08
2.77	6.64	41.71
2.31	6.26	36.90
2.30	6.19	37.15
2.12	6.00	35.33
2.08	5.58	37.27
1.92	5.45	35.22

Rendimientos Reales		
Volumen Hundido	Volumen Extraído	Rendimiento %
1.19×10^6	4.32×10^6	27.55
3.28	6.01	54.28
1.41	6.25	22.56
1.22	6.19	19.71
0.81	6.00	13.50
1.07	6.25	17.12
0.67	5.79	11.57
0.83	5.37	15.46
0.31	5.55	5.58
0.08	5.08	1.57

GASTO EN
MILL. DE M³



— VOLUMEN HUNDIDO TEORICO
- - - VOLUMEN HUNDIDO REAL

FIGURA 92 COMPARACION DE VOLUMENES HUNDIDOS:
TEORICO Y REAL

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

N-0528616

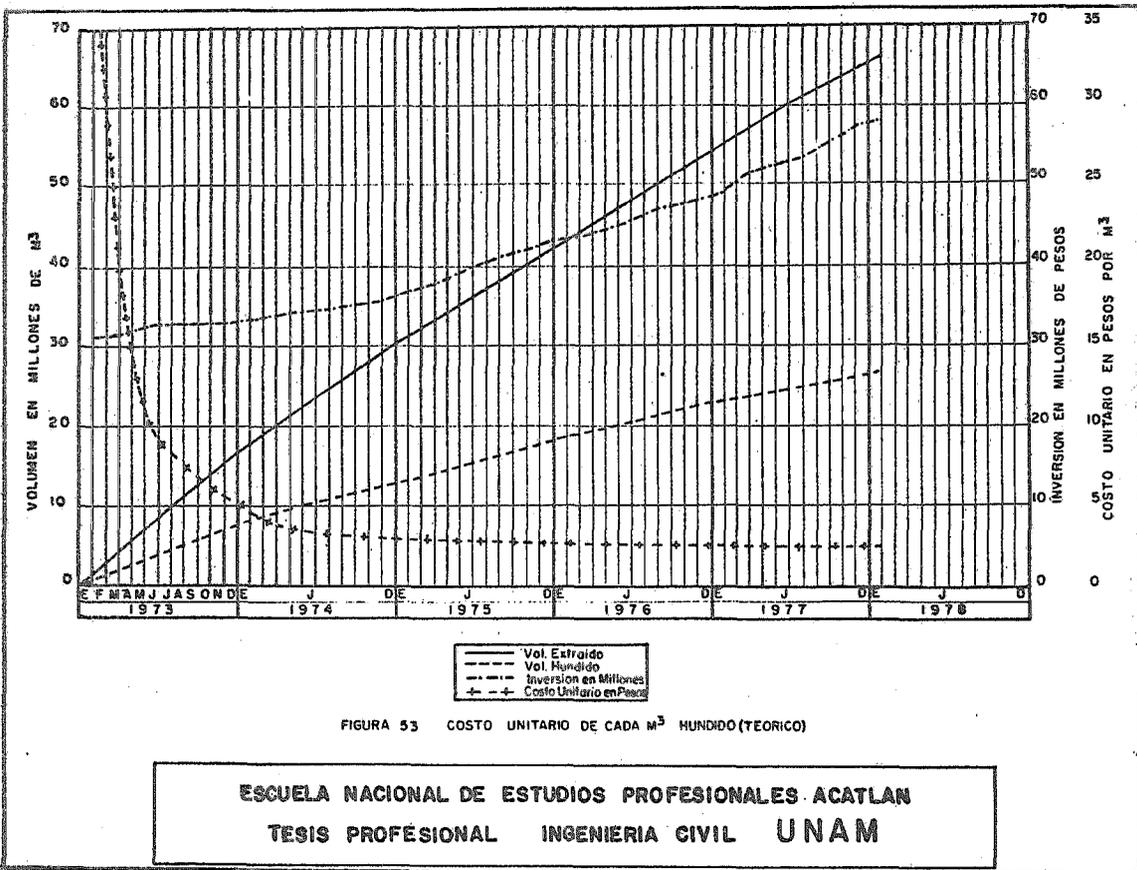
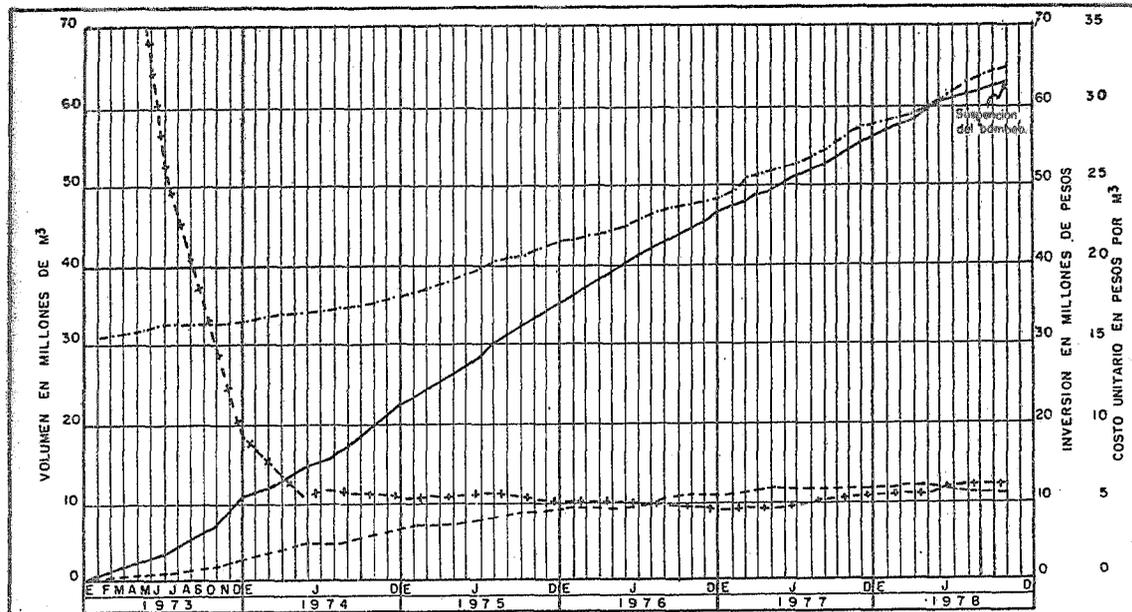


FIGURA 53 COSTO UNITARIO DE CADA M³ HUNDIDO (TEORICO)

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM



— Vol. Extraído
 - - - Vol. Hundido
 - - - Inversión en Millones
 + - + Costo Unitario en Pesos

FIGURA 54 COSTO UNITARIO DE CADA M³ HUNDIDO (REAL)

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
 TESIS PROFESIONAL INGENIERIA CIVIL UNAM

CAPITULO VII

CONCLUSIONES.

Las perforaciones y exploraciones geofísicas realizadas en la zona federal del Lago de Texcoco, han complementado el conocimiento geológico del Valle de México y no solo constituyen una contribución valiosa para la geología del país, sino también para la investigación de agua subterránea en el Valle.

Desde el punto de vista de la Ingeniería en cimentaciones, son de especial interés las características mecánicas de estratos que se encuentran hasta 100 m de profundidad, dado que los estudios en el laboratorio con muestras obtenidas de los sondeos BNP-1, 2 y 3 así como en los sondeos S-4, 5 y 6 demuestran que hasta una profundidad de 100 m y en la mayor parte del Lago, se encuentran suelos semejantes en cuanto a origen y propiedades a los de la ciudad de México.

En algunos puntos, del área del ex-Lago de Texcoco los estratos de arcillas y limos alcanzan profundidades de 150 m, la existencia de esos estratos hacen que los problemas de cimentaciones profundas sean más delicados, a excepción de una capa superficial expuesta a la acción del secado, cuyo espesor varía entre 0.5 m y 1.5 m, las arcillas hasta 30 m ó 35 m de profundidad tienen contenidos de agua variable entre 200 y 400 por ciento. Estas cifras dan una idea de la baja resistencia al corte y la alta compresibilidad de los suelos, es esta característica del subsuelo la que hace económicamente factible el desarrollo de lagos artificiales en esta zona.

En la creación del Lago artificial-Dr. Nabor Carrillo Flores"en la zona del ex=Lago de Texcoco los métodos que se utilizaron para determinar las posibilidades de su construcción fueron:

- a).- Excavaciones profundas con draga flotante.
- b).- Licuación de las arcillas con explosivos.
- c).- Bombeo de aguas del subsuelo en un campo de pozos someros

El primero de los métodos aplicado en la zona demostró que los rendimientos de excavación obtenidos durante el proceso del dragado hidráulico son aplicables a excavaciones en materiales como los que se encuentran en las capas superiores del fondo lacustre del Lago de Texcoco.

Para excavaciones de 4 millones de metros cúbicos o superiores y a profundidades de 10 y 12 m. se pudo obtener un costo de \$2.50/m³.

En este método se investigó la estabilidad de taludes, demostrando el procedimiento constructivo que los agrietamientos que se presentaron pueden ser controlados con una relación en el corte de talud 1:5.

Una de las desventajas que presentó este método fué el de necesitar un área demasiado grande para almacenar los lodos producto del bombeo lo que aumentó su costo debido a la gran cantidad de tubería que se requirió. Por otro lado, dichos lodos pierden parte de sus características mecánicas por el remoldeo que-

sufren y constructivamente no se les puede dar un uso apropiado.

El método de dragado resultó más rápido que el bombeo en pozos someros, sin embargo dado el incremento de su costo, económicamente no es aceptable su realización.

El segundo método consistió en provocar la pérdida de resistencia de las arcillas y limos por la acción de explosivos, transformándolos en un líquido viscoso que se pudiera transportar por tuberías mediante bombeo. El estudio respectivo quedó inconcluso, pues los diversos ensayos efectuados variando cargas - distribución y tipo de explosivos no produjeron una reducción suficiente de la resistencia de los materiales afectados por la detonación, no obstante que las citadas arcillas estaban constituidas por 75 por ciento aproximadamente de agua y solo 25 por ciento de sólidos, deduciéndose que su estructura es poco susceptible a la licuación y en cuanto al costo varió considerablemente, por lo que no es competitivo con los otros métodos.

El tercer procedimiento se efectuó bombeando agua del subsuelo lo que provocó la consolidación de las formaciones arcillosas y está basado principalmente en el conocido mecanismo que provoca el hundimiento de la Ciudad de México.

Durante el desarrollo de esta prueba se logró un vaso de almacenamiento de 275 000 m³ con una profundidad máxima de 1.70 m. y un costo de \$ 1.26/m³, tomando en cuenta los gastos de mantenimiento y operación de las bombas aún así este costo resultó más económico que el del dragado. Una de las características de este método es la forma de la de-

presión lograda al término del bombeo que depende de la distribución de los pozos, en la realización de este método se tuvo una área cuadrada de 300 m por lado, obteniéndose finalmente un lago de figura similar y para el caso del Lago "Dr. Nabor Carrillo Flores" la superficie era rectangular, lográndose un vaso con características más o menos elípticas.

De los tres procedimientos señalados anteriormente se concluye que el método de bombeo en pozos someros es atractivo no solo por las ventajas económicas que resultan de su construcción, sino que reduce considerablemente los problemas de estabilidad en las depresiones formadas, contrario a los que presentaban los taludes en la excavación lograda por la draga.

Las experiencias obtenidas en la construcción del Lago de prueba sirvieron para formar el lago "Dr. Nabor Carrillo Flores" cuyos resultados demostraron en este estudio y confirmaron en forma aceptable las condiciones consideradas por el método de bombeo en pozos someros.

VIII REFERENCIAS

- (1) Carrillo, Nabor. "El Hundimiento de la Ciudad de México" Proyecto Texcoco; Secretaría de Hacienda y Crédito Público. México (1969).
- (2) Proyecto Texcoco; Memoria de los Trabajos realizados y Conclusiones, Secretaría de Hacienda y Crédito Público Fiduciaria: Nacional Financiera, S.A. México (1969)
- (3) Herrera Ismael; Alberro Jesús: León José-Luis; Chen Benito "Análisis de Asentamientos para la Construcción de los Lagos del Plan Texcoco" Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. (1974).
- (4) Informe del Comportamiento del Lago "Dr. Nabor Carrillo Flores", Dirección de Investigación Geohidrológica de la Comisión del Lago de Texcoco. SARH (1972 a 1979).
- (5) Mejoramiento Masivo de Suelos, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C. (1979).
- (6) Serie de Ejercicios Sobre el Comportamiento de los Suelos, Facultad de Ingeniería. UNAM (1975).
- (7) Aspectos de la Problemática de la Ciudad de México, Dirección General de Saneamiento Ambiental Comisión Lago de Texcoco. SARH (1980).
- (8) Sondeos Profundos Complementarios Lago Texcoco Sur GEOTEC, S. A. Comisión del Lago de Texcoco. SARH (1975).

- (9) Alberro Jesús, Díaz Carlos "Evolución del Procedimiento de Formación de Almacenamientos en el Ex-vaso de Texcoco" Informe a la Comisión del Lago de Texcoco. SARH (1976).
- (10) Características del Subsuelo Lago Texcoco Sur, Primero y Segundo Reporte GEOTEC, S.A. Plan Lago de Texcoco. SARH (1972).
- (11) Reporte Parcial de las Características - del Subsuelo Lago Texcoco Sur GEOTEC, S.A. Plan Lago de Texcoco. SARH (1972).
- (12) Juárez Eulalio, Rico Alfonso "Mecánica - de Suelos Tomo 1 y 2" (1974).
- (13) Memorias del Drenaje Profundo D.D.F. Tomo 1, 2 y 3 (1975).
- (14) Mooser, Federico, Informe sobre la geología de la Cuenca del Valle de México y - zonas colindantes. Comisión Hidrológica - de la Cuenca del Valle de México, febrero 1961.